

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**



**ÂNDRIA GABRIEL DE SOUZA**

**AUTO-REGULADOR MAGNÉTICO DE TENSÃO A  
REATOR SATURADO: DIMENSIONAMENTO E  
PROJETO**

Recife, Fevereiro de 2012.

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**AUTO-REGULADOR MAGNÉTICO DE TENSÃO A**  
**REATOR SATURADO: DIMENSIONAMENTO E**  
**PROJETO**

por

**ÂNDRIA GABRIEL DE SOUZA**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da  
Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos para a obtenção do grau de  
Mestre em Engenharia Elétrica.

**ORIENTADOR: MANOEL AFONSO DE CARVALHO JÚNIOR, Ph.D.**

Recife, Fevereiro de 2012.

© Ândria Gabriel de Souza, 2012

Catálogo na fonte  
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

S729a Souza, Ândria Gabriel de.  
Auto-regulador magnético de tensão a reator saturado:  
dimensionamento e projeto / Ândria Gabriel de Souza. - Recife: O Autor,  
2012.  
xxiv, 202 folhas, il., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Manoel Afonso de Carvalho Júnior.  
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2012.  
Inclui Referências Bibliográficas, Apêndices e Anexos.

1. Engenharia Elétrica. 2. Regulação de Tensão. 3. Compensação Série.  
4. Reator Naturalmente Saturado. 5. Capacitores. 6. Reatores Lineares. 7.  
Resistência de Amortecimento. 8. Curtos-Circuitos. I. Carvalho Júnior,  
Manoel Afonso de. (Orientador). II. Título.

UFPE

621.3 CDD (22. ed.)

BCTG/2012-086



# Universidade Federal de Pernambuco

## Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA DE DEFESA DE  
DISSERTAÇÃO DO MESTRADO ACADÊMICO DE

# ÂNDRIA GABRIEL DE SOUZA

TÍTULO

**“AUTO-REGULADOR MAGNÉTICO DE TENSÃO A REATOR  
SATURADO: DIMENSIONAMENTO E PROJETO”**

A comissão examinadora composta pelos professores: MANOEL AFONSO DE CARVALHO JÚNIOR, DEE/UFPE, RONALDO RIBEIRO BARBOSA DE AQUINO, DEE/UFPE e BENEMAR ALENCAR DE SOUZA, DEE/UFCG sob a presidência do primeiro, consideram a candidata **ÂNDRIA GABRIEL DE SOUZA APROVADA.**

Recife, 16 de fevereiro de 2012.

**CECÍLIO JOSÉ LINS PIMENTEL**  
Coordenador do PPGEE

**MANOEL AFONSO DE CARVALHO JÚNIOR**  
Orientador e Membro Titular Externo

**BENEMAR ALENCAR DE SOUZA**  
Membro Titular Externo

**RONALDO RIBEIRO BARBOSA DE AQUINO**  
Membro Titular Interno

*Dedico este trabalho ao meu exemplo de vida, Severina que me deu não somente a vida, mas principalmente a minha educação e condições de estudo. Sua paciência infinita e sua crença absoluta na capacidade de realização a mim atribuída foram os elementos propulsores desta dissertação.*

## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu orientador, Prof. Manoel Afonso de Carvalho Júnior, pela oportunidade oferecida, orientação e confiança. Com ele tive a oportunidade de enriquecer meu conhecimento, com suas argumentações científicas, seu apoio, paciência e principalmente pelo bom convívio e horas de descontração nestes anos de trabalho;

À minha família, Thiago, Janaina, Thaynara, Thayna, Gilberto, Zélia, Joaquim, Senira e às saudosas lembranças de Celeste, Josefa e Norma Lúcia tão únicos para mim que viveram esse sonho comigo e compartilharam de cada momento ao longo de todos os anos da minha vida;

À Companhia Energética de Pernambuco (CELPE), por proporcionar a infraestrutura laboratorial e material no âmbito do programa de P&D ANEEL, ajuda essencial no desenvolvimento deste trabalho;

À amiga Janise pelo incentivo, força, amizade que se construiu para além dos espaços da universidade, pelos conselhos e puxões de orelhas exercendo muita vezes não só um papel de amiga mais de uma irmã mais velha, pelo carinho que compartilhamos durante nosso caminhar acadêmico;

À Prof. Milde Maria e à Valdete Oliveira pela orientação, apoio, compreensão, estímulo acadêmico, convívio e pela amizade;

Aos Professores Ronaldo Aquino e Luiz Antônio Magnata pelos conselhos, apoio e contribuição importantes na minha vida acadêmica;

Aos amigos Fernando Edier e Luanna Nery pelas contribuições importantes para a realização deste trabalho, pelo apoio e confiança;

A todos os colegas que de uma forma ou de outra contribuíram para a realização deste trabalho.

*"As pessoas grandes adoram os números. Quando a gente lhes fala de um novo amigo, elas jamais se informam do essencial. Não perguntam nunca: "Qual é o som da sua voz? Quais os brinquedos que prefere? Será que ele coleciona borboletas? ...Só se vê bem com o coração. O essencial é invisível aos olhos."*

*(O pequeno Príncipe)*

Resumo da Dissertação apresentada à UFPE como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

# **AUTO-REGULADOR MAGNÉTICO DE TENSÃO A REATOR SATURADO: DIMENSIONAMENTO E PROJETO**

**Ândria Gabriel De Souza**

Fevereiro/2012

Orientador: Manoel Afonso de Carvalho Júnior, Ph.D.

Área de Concentração: Processamento de Energia.

Palavras-chave: Regulação de Tensão, Compensação Série, Reator Naturalmente Saturado, Capacitores, Reatores Lineares, Resistência de Amortecimento, Curtos-Circuitos.

Número de Páginas: xxiv+202.

**RESUMO:** O controle da tensão em redes elétricas radiais é um dos maiores desafios das empresas de distribuição de energia no cumprimento da missão institucional de que está investida e o uso de reguladores de tensão tem sido uma prática habitual. Esta dissertação propõe uma alternativa mais econômica e eficaz não somente para o controle da tensão em estado permanente, mas também no transcurso de eventos transitórios como a limitação da corrente de curto-circuito e do controle do afundamento e elevação da tensão de consumidores conectados a montante durante um defeito a jusante do equipamento. O Auto-Regulador Magnético de Tensão a Reator Saturado (ARMTRS) para redes primária de distribuição é um dispositivo de baixo custo, atuação rápida e exibe um desempenho compatível com a finalidade pretendida. Neste sentido, o presente trabalho descreve, não só, o desenvolvimento completo do dimensionamento do ARMTRS e de todos os seus componentes, como também, os resultados dos estudos de aplicação de protótipos em tamanho reduzidos do ARMTRS em alimentadores reais da rede CELPE obtidos em simulação e experimentações laboratoriais. O desenvolvimento destes protótipos é fruto de um projeto de pesquisa e desenvolvimento firmado entre a Companhia Energética de Pernambuco, CELPE, com a UFPE.



Abstract of Dissertation presented to UFPE as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Electrical Engineering.

# **MAGNETIC AUTO-REGULATOR OF VOLTAGE BASE ON SATURATED REACTOR: MEASEUREMENT AND DESIGN**

**Ândria Gabriel De Souza**

February /2012

Supervisor(s): Manoel Afonso de Carvalho Júnior, Ph.D.

Concentration Area: Energy Processing.

Keywords: Voltage Regulation, Series Compensation, Naturally Saturated Reactor, Capacitors, Linear Reactors, Damping Resistance, Short-Circuits.

Number of Pages: xxiv+202.

**ABSTRACT:** Voltage control in electrical power networks is one of the most significant challenges for electric power distribution utilities in the fulfillment of institutional mission in which they are involved and use of voltage regulators has been a usual practice. This dissertation proposes a more effective and economical alternative not only to control steady-state voltage, but also the voltage in the course of transient events, such as limiting short-circuit currents and reducing the number and severity of voltage sags and swell of loads connected upstream of the equipment during the occurrence of a short-circuit downstream of it. The Magnetic Auto-Regulator of Voltage based on Saturated Reactor (ARMTRS) for primary distribution networks is a device of low cost, quick action and shows a compatible performance with the intended purpose. Therefore, this work describes not only the complete development of measuring the ARMTRS and all its components, as well as, shows the results of studies applying a reduced size prototype of the ARMTRS in a real electrical network of CELPE (the electrical power utility of Pernambuco) from simulation and laboratory studies. This prototype is result of a research and development project signed between CELPE (Companhia Energética de Pernambuco) and UFPE.

# Sumário

<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>XII</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>XX</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS.....</b>	<b>XXII</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS .....</b>	<b>XXIII</b>
<b>CAPITULO 1 .....</b>	<b>1</b>
<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAS .....	1
1.2 – OBJETIVOS PRETENDIDOS.....	3
1.3 – APRESENTAÇÃO DO TRABALHO.....	3
<b>CAPITULO 2 .....</b>	<b>5</b>
<b>APLICAÇÃO DO ARMTRS EM REDES TRIFÁSICAS DE DISTRIBUIÇÃO EM 13,8 KV .....</b>	<b>5</b>
2.1 – ANÁLISE DO SISTEMA ELÉTRICO.....	5
2.1.1 – Alimentador - SLM-01C3 .....	5
2.1.2 – Alimentador – ITA-03 .....	8
2.2 – ESPECIFICAÇÃO DO PONTO PARA A INSTALAÇÃO DO ARMTRS .....	11
2.2.1 – Alimentador - SLM-01C3 .....	11
2.2.2 – Alimentador – ITA-03.....	14
2.3 – ANÁLISE DO DESEMPENHO DO ARMTRS NO SISTEMA CELPE .....	17
2.3.1 – Análise em regime permanente.....	17
2.3.2 – Análise em regime transitório .....	23
2.3.2.1 – Curto-circuito monofásico.....	24
2.3.2.2 – Curto-circuito bifásico com terra.....	34
2.3.2.3 – Curto-circuito trifásico.....	40
2.3.3 – Controle do afundamento de tensão.....	46
2.3.4 – Análise do ARMTRS após a remoção do defeito.....	50
2.3.5 – Análise do RLS durante um defeito .....	54
<b>CAPITULO 3 .....</b>	<b>57</b>
<b>DIMENSIONAMENTO DO ARMTRS -13,8KV - CABEÇA DE SÉRIE .....</b>	<b>57</b>
3.1 – CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES .....	57
3.2 – ROTINA DE CÁLCULO .....	62
3.3 – CURVA DE MAGNETIZAÇÃO.....	63
3.4 – DIMENSIONAMENTO DO REATOR NATURALMENTE SATURADO – RNS .....	64
3.4.1 – Dimensionamento do condutor para o Reator Naturalmente Saturado – RNS .....	70
3.5– DIMENSIONAMENTO DO REATOR LINEAR SÉRIE – RLS – ESTRUTURA FERROMAGNÉTICA .....	71
3.5.1 – Dimensionamento do condutor para o Reator Linear Série – RLS – Estrutura ferromagnética .....	75

3.6– DIMENSIONAMENTO DO RETORNO.....	77
3.7– DIMENSIONAMENTO DO REATOR LINEAR SÉRIE – RLS – NÚCLEO DE AR - LIMITADOR DE CORRENTE DE CURTO.....	78
3.7.1 – Cálculos das Bobinas Curtas .....	79
3.7.2 – Cálculos das Bobinas Longas .....	81
3.8– DESENHOS DE PROJETOS DOS COMPONENTES DO PROTÓTIPO DO ARMTRS 13,8kV – CABEÇA DE SÉRIE.....	83
3.8.1 – Dimensões Físicas – Alimentador SLM-01C3 .....	83
3.8.2 – Dimensões Físicas – Alimentador ITA-03.....	86
3.8.3 – Arquitetura dos enrolamentos - Alimentador - SLM-01C3.....	89
3.8.4 – Arquitetura dos enrolamentos - Alimentador - ITA-03.....	91
3.8.5 – Dimensões Físicas – Bobina de Núcleo de Ar.....	92
3.8.5.1 – Bobina Curta .....	92
3.8.5.2 – Bobina Longa .....	93
<b>CAPÍTULO 4.....</b>	<b>94</b>
<b>DADOS EXPERIMENTAIS E DE SIMULAÇÃO DO ARMTRS - 380V– PROTÓTIPO DE BANCADA.....</b>	<b>94</b>
4.1 - CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES.....	94
4.2 – DIMENSIONAMENTO E MONTAGEM DOS PROTÓTIPOS DE BANCADA 380 V .....	94
4.3 – MODELAGEM DO SISTEMA.....	96
4.3.1 – Modelagem do RNS.....	97
4.3.1.1 – Dualidade da Estrutura Assimétrica e Simétrica.....	98
4.3.2 – Curva característica $\lambda \times i$ do RNS.....	99
4.3.3 – Curva característica $V \times i$ do RLS.....	100
4.4 – RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	100
4.5 - RESULTADOS DE SIMULAÇÃO .....	103
4.5.1 – Resultados de Simulação sem dualidade eletromagnética.....	103
4.5.2 – Resultados de Simulação com dualidade eletromagnética .....	110
4.6 – ANÁLISE DO ARMTRS APÓS A REMOÇÃO DO DEFEITO.....	116
4.7 – AUTO-AJUSTE DA TENSÃO DO ARMTRS .....	119
4.8 – RESULTADOS OBTIDOS ATRAVÉS DO PROGRAMA FEMM.....	120
4.8.1 – Regime Permanente.....	120
4.8.2 – Durante um defeito.....	124
<b>CAPITULO 5.....</b>	<b>126</b>
<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>126</b>
5.1 – CONCLUSÃO.....	126
5.2 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	128
5.3 – PUBLICAÇÕES .....	128
<b>APÊNDICE .....</b>	<b>129</b>
6.1 – CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA TESTE – SLM-01C3 .....	129
6.2 – ROTEIRO EM ATP DO SISTEMA SLM-01C3 SEM ARMTRS .....	130
6.3 – CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA TESTE – ITA-03 .....	133
6.4 – ROTEIRO EM ATP DO SISTEMA ITA-03 SEM ARMTRS .....	133
6.5 – ROTEIRO EM ATP DO SISTEMA SLM-01C3 COM ARMTRS .....	136
6.6 – ROTEIRO EM ATP DO SISTEMA ITA-03 COM ARMTRS.....	141

6.7 – ANÁLISE DO SISTEMA SLM-01C3 EM REGIME PERMANENTE SENOIDAL DE OPERAÇÃO AO LONGO DOS ANOS .....	147
6.8 – ANÁLISE DO SISTEMA ITA-03 EM REGIME PERMANENTE SENOIDAL DE OPERAÇÃO AO LONGO DOS ANOS.....	149
6.9 – ANÁLISE DAS DIFERENTES ARQUITETURAS – SLM-01C3.....	150
6.10 – ROTEIRO EM ATP DA ESTRUTURA ASSIMÉTRICA COM ELEMENTO 98 E SEM DUAL ELETROMAGNÉTICO .....	152
6.11 – ROTEIRO EM ATP DA ESTRUTURA SIMÉTRICA COM ELEMENTO 98 E SEM DUAL ELETROMAGNÉTICO .....	153
6.12 – ROTEIRO EM ATP DA ESTRUTURA ASSIMÉTRICA COM ELEMENTO 96 E SEM DUAL ELETROMAGNÉTICO .....	154
6.13 – ROTEIRO EM ATP DA ESTRUTURA SIMÉTRICA COM ELEMENTO 96 E SEM DUAL ELETROMAGNÉTICO .....	156
6.14 – ROTEIRO EM ATP DA ESTRUTURA ASSIMÉTRICA COM ELEMENTO 98 E COM DUAL ELETROMAGNÉTICO .....	157
6.15 – ROTEIRO EM ATP DA ESTRUTURA SIMÉTRICA COM ELEMENTO 98 E COM DUAL ELETROMAGNÉTICO .....	162
6.16 – ROTEIRO EM ATP DA ESTRUTURA ASSIMÉTRICA COM ELEMENTO 96 E COM DUAL ELETROMAGNÉTICO .....	166
6.17 – ROTEIRO EM ATP DA ESTRUTURA SIMÉTRICA COM ELEMENTO 96 E COM DUAL ELETROMAGNÉTICO .....	174
<b>ANEXOS .....</b>	<b>181</b>
7.1 – PARÂMETROS ELÉTRICOS DE CÉLULAS CAPACITIVAS .....	181
7.2 – DESENHO DE PROJETO DA ESTRUTURA ASSIMÉTRICA DO PROTÓTIPO DE BANCADA – ARMTRS – 380V .....	181
7.3 – DESENHO DE PROJETO DA ESTRUTURA SIMÉTRICA DO PROTÓTIPO DE BANCADA – ARMTRS – 380V .....	183
7.4 – CURVA DE MAGNETIZAÇÃO E PERDAS DO PROTÓTIPO DE BANCADA – 380V FORNECIDA PELO FABRICANTE.....	184
7.5 – RESULTADOS DE ENSAIO PARA OBTENÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DA IMPEDÂNCIA EQUIVALENTE DO SISTEMA .....	185
7.6 – RESULTADOS DE ENSAIO PARA OBTENÇÃO DA RESISTÊNCIA QUE REPRESENTA A CARGA DO SISTEMA .....	186
7.7 – RESULTADOS DE ENSAIO PARA OBTENÇÃO DA RESISTÊNCIA QUE REPRESENTA O DEFEITO .....	187
7.8 – RESULTADOS DE ENSAIO PARA OBTENÇÃO DA REATÂNCIA CAPACITIVA DO BCS... ..	188
7.9 – RESULTADOS DE ENSAIO PARA OBTENÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DO REATOR NATURALMENTE SATURADO (RNS).....	189
7.10 – RESULTADOS DE ENSAIO PARA OBTENÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DO REATOR LINEAR SÉRIE (RLS) .....	193
7.11 – CURVA CARACTERÍSTICA $I_X / I$ USADA NA MODELAGEM DO ELEMENTO NONLINEAR CURRENT-DEPENDENT INDUCTOR (TYPE 96).....	196
7.12 – CURVA CARACTERÍSTICA $I_X / I$ USADA NA MODELAGEM DOS PROTÓTIPOS DE BANCADA COM DUALIDADE ELETROMAGNÉTICA .....	197
7.13 – RESULTADOS DE ENSAIO PARA AUTO-REGULAÇÃO DA CARGA CONECTADA A JUSANTE DO ARMTRS .....	199
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>200</b>

## Lista de Figuras

<b>Figura 1.1</b> – Arquitetura do ARMTRS. ....	2
<b>Figura 2.1</b> – Rede trifásica de distribuição em 13,8kV – SLM - 01C3. ....	5
<b>Figura 2.2</b> – Representação Eletrogeográfica – SLM-01C3. ....	6
<b>Figura 2.3</b> – Perfil das tensões nas barras por unidade (pu) – SLM -01C3. ....	7
<b>Figura 2.4</b> – Forma de onda das tensões no Ponto P0(○) e na Barra 11 a 8,5km da fonte (□) – (a) Fase A; (b) Fase B e (c) Fase C – SLM - 01C3. ....	8
<b>Figura 2.5</b> – Rede trifásica de distribuição em 13,8kV – ITA- 03. ....	8
<b>Figura 2.6</b> – Representação Eletrogeográfica – ITA-03. ....	9
<b>Figura 2.7</b> – Perfil das tensões nas barras por unidade (pu) – ITA-03. ....	10
<b>Figura 2.8</b> – Forma de onda das tensões no Ponto P0(○) e na Barra B10 a 14,5km da fonte (□) – (a) Fase A; (b) Fase B e (c) Fase C – ITA - 03. ....	11
<b>Figura 2.9</b> – Sistema com a presença do ARMTRS - compensação série do sistema SLM- 01C3. ....	12
<b>Figura 2.10</b> – Perfil da tensão da fase A nas barras sem e com o ARMTRS em pu – SLM- 01C3. ....	12
<b>Figura 2.11</b> – Perfil da tensão da fase B nas barras sem e com o ARMTRS em pu – SLM- 01C3. ....	13
<b>Figura 2.12</b> – Perfil da tensão da fase C nas barras sem e com o ARMTRS em pu – SLM- 01C3. ....	13
<b>Figura 2.13</b> – Forma de onda das tensões no Ponto P0(○) e na Barra 11 a 8,5km da fonte (□) – SLM – 01C3 – (a) Fase A; (b) Fase B e (c) Fase C. ....	14
<b>Figura 2.14</b> – Sistema com a presença do ARMTRS - compensação série do sistema ITA- 03. ....	15
<b>Figura 2.15</b> – Perfil da tensão da fase A nas barras sem e com o ARMTRS em pu – ITA- 03. ....	15
<b>Figura 2.16</b> – Perfil da tensão da fase B nas barras sem e com o ARMTRS em pu – ITA- 03. ....	16
<b>Figura 2.17</b> – Perfil da tensão da fase C nas barras sem e com o ARMTRS em pu – ITA- 03. ....	16
<b>Figura 2.18</b> – Forma de onda das tensões no Ponto P0(○) e na Barra B10 a 14,5km da fonte (□) – (a) Fase A; (b) Fase B e (c) Fase C - ITA – 03. ....	17
<b>Figura 2.19</b> – Perfil das tensões em regime permanente para diversos tipos de carregamento - SLM-01C3 – Fase A. ....	20
<b>Figura 2.20</b> – Perfil das tensões em regime permanente para diversos tipos de carregamento - SLM-01C – Fase B. ....	20
<b>Figura 2.21</b> – Perfil das tensões em regime permanente para diversos tipos de carregamento - SLM-01C3 – Fase C. ....	21
<b>Figura 2.22</b> – Perfil das tensões em regime permanente para o ano 4, com e sem alteração do BCS - SLM-01C3 – Fase A. ....	21
<b>Figura 2.23</b> – Perfil das tensões em regime permanente para o ano 4, com e sem alteração do BCS - SLM-01C3 – Fase B. ....	21
<b>Figura 2.24</b> – Perfil das tensões em regime permanente para o ano 4, com e sem alteração do BCS - SLM-01C3 – Fase C. ....	22

<b>Figura 2.25</b> – Perfil das tensões em regime permanente para diversos tipos de carregamento - Fase A – ITA-03. ....	22
<b>Figura 2.26</b> – Perfil das tensões em regime permanente para diversos tipos de carregamento - Fase B – ITA-03. ....	23
<b>Figura 2.27</b> – Perfil das tensões em regime permanente para diversos tipos de carregamento - Fase C – ITA-03. ....	23
<b>Figura 2.28</b> – Curto circuito na barra de carga, a 8,56km da SE – SLM-01C3. ....	24
<b>Figura 2.29</b> – Curto circuito na barra de carga, a 14,5km da SE – ITA-03. ....	24
<b>Figura 2.30</b> – Corrente de carga durante um curto circuito na fase A – Fase A (○), fase B (□) e fase C (Δ) – (a) SLM-01C3 e (b) ITA-03. ....	25
<b>Figura 2.31</b> – Histograma em pu da corrente fundamental devido a um curto-circuito monofásico na fase A, a 8,5km do ponto de suprimento, com o ARMTRS; (a) Fase B e (b) Fase C – SLM-01C3. ....	25
<b>Figura 2.32</b> – Histograma em pu da corrente fundamental devido a um curto-circuito monofásico na fase A, a 14,5km do ponto de suprimento, com o ARMTRS; (a) Fase B e (b) Fase C – ITA-03. ....	26
<b>Figura 2.33</b> – Corrente para um curto- circuito aplicado na barra de carga a 8,5 km do ponto de suprimento (a) sem a presença do ARMTRS e (b) com a presença do ARMTRS – SLM-01C3. ....	27
<b>Figura 2.34</b> – Corrente para um curto- circuito aplicado na barra de carga a 14,5 km do ponto de suprimento (a) sem a presença do ARMTRS e (b) com a presença do ARMTRS – ITA-03. ....	28
<b>Figura 2.35</b> – Forma de onda das correntes: (○) Corrente no RNS, (□) Corrente no BCS e (Δ) Corrente Total – (a) SLM-01C3 e (b) ITA-03. ....	28
<b>Figura 2.36</b> – Curva de suportabilidade das células capacitivas. ....	30
<b>Figura 2.37</b> – Forma de onda da corrente no BCS antes e durante um curto na fase A – (a) SLM-01C3 e (b) ITA-03. ....	31
<b>Figura 2.38</b> – Forma de onda da corrente no BCS durante um curto na fase A – (a) Fase B e (b) Fase C - SLM-01C3; (c) Fase B e (d) Fase C – ITA-03. ....	32
<b>Figura 2.39</b> – Forma de onda da tensão nos terminais do BCS antes e durante um curto na fase A – (a) SLM-01C3 e (b) ITA-03. ....	32
<b>Figura 2.40</b> – Forma de onda da tensão no BCS durante um curto na fase A – (a) Fase B e (b) Fase C - SLM-01C3; (c) Fase B e (d) Fase C – ITA-03. ....	33
<b>Figura 2.41</b> – Corrente de carga durante um curto circuito bifásico com terra entre as fases A e B – Fase A (○), fase B (□) e fase C (Δ) – (a) SLM-01C3 e (b) ITA-03. ....	34
<b>Figura 2.42</b> – Histograma em pu da corrente fundamental para a fase C, devido a um curto-circuito bifásico entre as fases A e B, a 8,5km do ponto de suprimento, com o ARMTRS – SLM-01C3. ....	34
<b>Figura 2.43</b> – Histograma em pu da corrente fundamental para a fase C, devido a um curto-circuito bifásico entre as fases A e B, a 14,5km do ponto de suprimento, com o ARMTRS – ITA-03. ....	35
<b>Figura 2.44</b> – Forma de onda das correntes: (○) Corrente no RNS, (□) Corrente no BCS e (Δ) Corrente Total – (a) Fase A e (b) Fase B - SLM-01C3. ....	36
<b>Figura 2.45</b> – Forma de onda das correntes: (○) Corrente no RNS, (□) Corrente no BCS e (Δ) Corrente Total – (a) Fase A e (b) Fase B - ITA-03. ....	36
<b>Figura 2.46</b> – Forma de onda da corrente no BCS antes e durante um curto-circuito circuito bifásico com terra entre as fases A e B – (a) Fase A e (b) Fase B - SLM-01C3. ....	37

<b>Figura 2.47</b> – Forma de onda da corrente no BCS antes e durante um curto-circuito circuito bifásico com terra entre as fases A e B – (a) Fase A e (b) Fase B - ITA-03...	37
<b>Figura 2.48</b> – Forma de onda da corrente no BCS na fase C durante um curto bifásico com terra entre as fases A e B – (a) SLM-01C3 e (b) ITA-03. ....	38
<b>Figura 2.49</b> – Forma de onda da tensão nos terminais do BCS antes e durante um curto-circuito bifásico com terra – (a) Fase A e (b) Fase B - SLM-01C3. ....	39
<b>Figura 2.50</b> – Forma de onda da tensão nos terminais do BCS antes e durante um curto-circuito bifásico com terra – (a) Fase A e (b) Fase b - ITA-03.....	39
<b>Figura 2.51</b> – Forma de onda da tensão no BCS na fase C durante um curto-circuito bifásico com terra – (a) SLM-01C3 e (b) ITA-03. ....	40
<b>Figura 2.52</b> – Corrente de carga durante um curto circuito trifásico – Fase A (○), fase B (□) e fase C (Δ) – (a) SLM-01C3 e (b) ITA-03. ....	40
<b>Figura 2.53</b> – Forma de onda das correntes: (○) Corrente no RNS, (□) Corrente no BCS e (Δ) Corrente Total – (a) Fase A, (b) Fase B e (c) Fase C - SLM-01C3. ....	41
<b>Figura 2.54</b> – Forma de onda das correntes: (○) Corrente no RNS, (□) Corrente no BCS e (Δ) Corrente Total – (a) Fase A, (b) Fase B e (c) Fase C - ITA-03. ....	42
<b>Figura 2.55</b> – Forma de onda da corrente no BCS antes e durante um curto-circuito circuito trifásico – (a) Fase A, (b) Fase B e (c) Fase C - SLM-01C3. ....	43
<b>Figura 2.56</b> – Forma de onda da corrente no BCS antes e durante um curto-circuito circuito trifásico – (a) Fase A, (b) Fase B, (c) Fase C - ITA-03. ....	44
<b>Figura 2.57</b> – Forma de onda da tensão nos terminais do BCS antes e durante um curto-circuito trifásico – (a) Fase a, (b) Fase B e (c) Fase C - SLM-01C3.....	45
<b>Figura 2.58</b> – Forma de onda da tensão nos terminais do BCS antes e durante um curto-circuito trifásico – (a) Fase A, (b) Fase B e (c) Fase C - ITA-03. ....	46
<b>Figura 2.59</b> – Perfil de tensão para cargas conectadas a montante do ARMTRS durante um curto-circuito a jusante na fase A – SLM-01C3. ....	47
<b>Figura 2.60</b> – Perfil de tensão para cargas conectadas a montante do ARMTRS durante um curto-circuito monofásico na fase A a jusante do ARMTRS – ITA-03 (Projeto sem ajuste). ....	48
<b>Figura 2.61</b> – Arquitetura do ARMTRS para o alimentador de ITA-03. ....	49
<b>Figura 2.62</b> – Perfil de tensão para cargas conectadas a montante do ARMTRS durante um curto-circuito a jusante na fase A – ITA-03. ....	50
<b>Figura 2.63</b> – Forma de onda da corrente no reator saturado, antes, durante e depois um defeito – (a) SLM-01C3 e (b) ITA-03. ....	51
<b>Figura 2.64</b> – Arquitetura do ARMTRS com resistência de amortecimento – (a) SLM-01C3 e (b) ITA-03. ....	51
<b>Figura 2.65</b> – Forma de onda da corrente no RNS antes, durante e depois um defeito com resistência de amortecimento – (a) SLM-01C3 e (b) ITA-03. ....	52
<b>Figura 2.66</b> – (a) Arquitetura ARMTRS – B; (b) Arquitetura ARMTRS – C; (c) Arquitetura ARMTRS – C e (d) Arquitetura ARMTRS – D; ....	53
<b>Figura 2.67</b> – Forma de onda da tensão no reator linear durante um defeito – SLM-01C3. ....	54
<b>Figura 2.68</b> – Comportamento do reator naturalmente saturado com tensão senoidal aplicado aos seus terminais.....	55
<b>Figura 2.69</b> – Forma de onda da tensão no RLS (○) e da corrente no RNS (□) durante um defeito – SLM-01C3. ....	55
<b>Figura 2.70</b> – Forma de onda da tensão no RLS durante um defeito – ITA-03. ....	56

<b>Figura 3.1</b> – Decomposição do RLS na Arquitetura do ARMTRS para o alimentador de SLM-01C3.....	57
<b>Figura 3.2</b> – Esquemático do RLS com núcleo de ferro. ....	58
<b>Figura 3.3</b> – Reator Linear Série com núcleo de ar aplicado em alta-tensão.....	59
<b>Figura 3.4</b> – Estruturas eletromagnéticas em monoblocos. ....	60
<b>Figura 3.5</b> – Estruturas eletromagnéticas individuais por fase. ....	60
<b>Figura 3.6</b> – (a) Modelo ferromagnético da Estrutura Assimétrica e (b) Modelo ferromagnético da Estrutura Simétrica. ....	61
<b>Figura 3.7</b> – Curva de Magnetização (BxH) do aço M125-27-E004. ....	64
<b>Figura 3.8</b> – Circuito com um único núcleo. ....	64
<b>Figura 3.9</b> – Característica de magnetização.....	65
<b>Figura 3.10</b> – Seção transversal do núcleo do RNS com quatro step.....	67
<b>Figura 3.11</b> – Curva $V \times I$ para a Estrutura Assimétrica e Simétrica. ....	69
<b>Figura 3.12</b> – Bobina do RNS. ....	70
<b>Figura 3.13</b> – Fenômeno de espraiamento (Fringing Flux). ....	71
<b>Figura 3.14</b> – Vista superior do ARMTRS – RLS com a mesma área do RNS. ....	72
<b>Figura 3.15</b> – Seção circular do RLS com 4 steps. ....	73
<b>Figura 3.16</b> - Bobina do RLS. ....	77
<b>Figura 3.17</b> – Layout de uma bobina de núcleo de ar. ....	78
<b>Figura 3.18</b> – Bobina de camada única com forma cilíndrica. ....	78
<b>Figura 3.19</b> – Bobina Longa e Curta. ....	79
<b>Figura 3.20</b> – Dimensões físicas da estrutura ferromagnética Assimétrica (todas as unidades estão em milímetros) - SLM-01C3. ....	84
<b>Figura 3.21</b> – Dimensões físicas da estrutura ferromagnética Assimétrica – Vista Superior dos núcleos (todas as unidades estão em milímetros) - SLM-01C3. ....	85
<b>Figura 3.22</b> – Dimensões físicas da estrutura ferromagnética Simétrica (todas as unidades estão em milímetros) - SLM-01C3.....	85
<b>Figura 3.23</b> – Dimensões físicas da estrutura ferromagnética Simétrica – Vista Superior dos núcleos (todas as unidades estão em milímetros) – SLM-01C3. ....	86
<b>Figura 3.24</b> – Dimensões físicas da estrutura ferromagnética Assimétrica (todas as unidades estão em milímetros) – ITA-03.....	87
<b>Figura 3.25</b> – Dimensões físicas da estrutura ferromagnética Assimétrica – Vista Superior dos núcleos (todas as unidades estão em milímetros) – ITA-03. ....	87
<b>Figura 3.26</b> – Dimensões físicas da estrutura ferromagnética Simétrica (todas as unidades estão em milímetros) – ITA-03. ....	88
<b>Figura 3.27</b> – Dimensões físicas da estrutura ferromagnética Simétrica – Vista Superior dos núcleos (todas as unidades estão em milímetros) – ITA-03. ....	88
<b>Figura 3.28</b> – Arquitetura dos enrolamentos – Estrutura ferromagnética Assimétrica (todas as unidades estão em milímetros) – SLM-01C3. ....	90
<b>Figura 3.29</b> – Arquitetura dos enrolamentos – Estrutura ferromagnética Simétrica (todas as unidades estão em milímetros) – SLM-01C3. ....	90
<b>Figura 3.30</b> – Arquitetura dos enrolamentos – Estrutura ferromagnética Assimétrica (todas as unidades estão em milímetros) – ITA-01C3.....	91
<b>Figura 3.31</b> – Arquitetura dos enrolamentos – Estrutura ferromagnética Simétrica (todas as unidades estão em milímetros) – ITA-01C3.....	92
<b>Figura 3.32</b> – Bobina curta (a) Vista Superior e (b) Vista Frontal. ....	93
<b>Figura 3.33</b> – Bobina Longa (a) Vista superior e (b) Vista frontal. ....	93
<b>Figura 4.1</b> – (A) Representa umas das bobinas construídas; (B) Representa as bobinas com as chapas de aço parcialmente montadas; (C) Representa a forma de montagem	



dos protótipos; (D) Representa a Estrutura Assimétrica construída e (E) Representa a Estrutura Simétrica construída. ....	95
<b>Figura 4.2</b> – Montagem do sistema para experimentação e simulação. ....	96
<b>Figura 4.3</b> – Circuito dual equivalente. ....	98
<b>Figura 4.4</b> – Montagem do sistema Dualidade da Estrutura Assimétrica. ....	98
<b>Figura 4.5</b> – Montagem do sistema Dualidade da Estrutura Simétrica. ....	99
<b>Figura 4.6</b> – Curva característica $\lambda \times i$ . ....	99
<b>Figura 4.7</b> – Curva característica $V \times i$ . ....	100
<b>Figura 4.8</b> – Forma de onda da corrente de carga ( $\Delta$ ), RNS ( $\circ$ ) e BCS ( $\square$ ) para a Estrutura Assimétrica em regime permanente, no transitório e durante um defeito. ....	100
<b>Figura 4.9</b> – Forma de onda da corrente de carga ( $\Delta$ ), RNS ( $\circ$ ) e BCS ( $\square$ ) para a Estrutura Simétrica em regime permanente, no transitório e durante um defeito. ....	101
<b>Figura 4.10</b> – Forma de onda da tensão ( $\circ$ ) e da corrente ( $\square$ ) no RNS para a Estrutura Assimétrica em regime permanente, no transitório e durante um defeito. ....	101
<b>Figura 4.11</b> – Forma de onda da tensão ( $\circ$ ) e da corrente ( $\square$ ) no RNS para a Estrutura Simétrica em regime permanente, no transitório e durante um defeito. ....	102
<b>Figura 4.12</b> – Forma de onda da tensão na carga para a Estrutura Assimétrica em regime permanente, no transitório e durante um defeito. ....	102
<b>Figura 4.13</b> – Forma de onda da tensão na carga para a Estrutura Simétrica em regime permanente, no transitório e durante um defeito. ....	103
<b>Figura 4.14</b> – Forma de onda da corrente de carga para a Estrutura Assimétrica. Type 98 ( $\circ$ ), Type 96 ( $\Delta$ ) e Experimento ( $\square$ ). ....	104
<b>Figura 4.15</b> – Forma de onda da corrente de carga para a Estrutura Simétrica. Type 98 ( $\circ$ ), Type 96 ( $\Delta$ ) e Experimento ( $\square$ ). ....	104
<b>Figura 4.16</b> – Forma de onda da tensão na carga para a Estrutura Assimétrica. Type 98 ( $\circ$ ), Type 96 ( $\Delta$ ) e Experimento ( $\square$ ). ....	105
<b>Figura 4.17</b> – Forma de onda da tensão na carga para a Estrutura Simétrica. Type 98 ( $\circ$ ), Type 96 ( $\Delta$ ) e Experimento ( $\square$ ). ....	105
<b>Figura 4.18</b> – Forma de onda da tensão no BCS e RNS para a Estrutura Assimétrica. Type 98 ( $\circ$ ), Type 96 ( $\Delta$ ) e Experimento ( $\square$ ). ....	106
<b>Figura 4.19</b> – Forma de onda da tensão no BCS e RNS para a Estrutura Simétrica. Type 98 ( $\circ$ ), Type 96 ( $\Delta$ ) e Experimento ( $\square$ ). ....	106
<b>Figura 4.20</b> – Forma de onda da corrente no BCS para a Estrutura Assimétrica. Type 98 ( $\circ$ ), Type 96 ( $\Delta$ ) e Experimento ( $\square$ ). ....	107
<b>Figura 4.21</b> – Forma de onda da corrente no BCS para a Estrutura Simétrica. Type 98 ( $\circ$ ), Type 96 ( $\Delta$ ) e Experimento ( $\square$ ). ....	107
<b>Figura 4.22</b> – Forma de onda da corrente no RNS para a Estrutura Assimétrica. Type 98 ( $\circ$ ), Type 96 ( $\Delta$ ) e Experimento ( $\square$ ). ....	108
<b>Figura 4.23</b> – Forma de onda da corrente no RNS para a Estrutura Simétrica. Type 98 ( $\circ$ ), Type 96 ( $\Delta$ ) e Experimento ( $\square$ ). ....	108
<b>Figura 4.24</b> – Forma de onda da corrente de carga para a Estrutura Assimétrica com dualidade eletromagnética. Type 98 ( $\circ$ ), Type 96 ( $\Delta$ ) e Experimento ( $\square$ ). ....	110
<b>Figura 4.25</b> – Forma de onda da corrente de carga para a Estrutura Simétrica com dualidade eletromagnética. Type 98 ( $\circ$ ), Type 96 ( $\Delta$ ) e Experimento ( $\square$ ). ....	110
<b>Figura 4.26</b> – Forma de onda da tensão na carga para a Estrutura Assimétrica com dualidade eletromagnética. Type 98 ( $\circ$ ), Type 96 ( $\Delta$ ) e Experimento ( $\square$ ). ....	111
<b>Figura 4.27</b> – Forma de onda da tensão na carga para a Estrutura Simétrica com dualidade eletromagnética. Type 98 ( $\circ$ ), Type 96 ( $\Delta$ ) e Experimento ( $\square$ ). ....	111

<b>Figura 4.28</b> – Forma de onda da tensão no BCS e RNS para a Estrutura Assimétrica com dualidade eletromagnética. Type 98 (○), Type 96 (Δ) e Experimento (□). .....	112
<b>Figura 4.29</b> – Forma de onda da tensão no BCS e RNS para a Estrutura Simétrica com dualidade eletromagnética. Type 98 (○), Type 96 (Δ) e Experimento (□). .....	112
<b>Figura 4.30</b> – Forma de onda da corrente no BCS para a Estrutura Assimétrica com dualidade eletromagnética. Type 98 (○), Type 96 (Δ) e Experimento (□). .....	113
<b>Figura 4.31</b> – Forma de onda da corrente no BCS para a Estrutura Simétrica com dualidade eletromagnética. Type 98 (○), Type 96 (Δ) e Experimento (□). .....	113
<b>Figura 4.32</b> – Forma de onda da corrente no RNS para a Estrutura Assimétrica com dualidade eletromagnética. Type 98 (○), Type 96 (Δ) e Experimento (□). .....	114
<b>Figura 4.33</b> – Forma de onda da corrente no RNS para a Estrutura Simétrica com dualidade eletromagnética. Type 98 (○), Type 96 (Δ) e Experimento (□). .....	114
<b>Figura 4.34</b> – Forma de onda da corrente no RNS para a Estrutura Assimétrica antes, durante e depois da retirada de um defeito – Resultado experimental. ....	116
<b>Figura 4.35</b> – Forma de onda da corrente no RNS para a Estrutura Simétrica antes, durante e depois da retirada de um defeito – Resultado experimental. ....	117
<b>Figura 4.36</b> – Forma de onda da corrente no RNS para a Estrutura Assimétrica antes, durante e depois da retirada de um defeito – Resultado de Simulação. ....	117
<b>Figura 4.37</b> – Forma de onda da corrente no RNS para a Estrutura Simétrica antes, durante e depois da retirada de um defeito – Resultado de Simulação. ....	118
<b>Figura 4.38</b> – Forma de onda da corrente no RNS para a Estrutura Assimétrica com a bobina própria da Estrutura Simétrica. Antes, durante e depois da retirada de um defeito – Resultado de Simulação. ....	118
<b>Figura 4.39</b> – Forma de onda da corrente no RNS para a Estrutura Simétrica com a bobina própria da Estrutura Assimétrica. Antes, durante e depois da retirada de um defeito – Resultado de Simulação. ....	119
<b>Figura 4.40</b> – Curva $V \times I$ sob a carga a jusante do ARMTRS. ....	120
<b>Figura 4.41</b> – Linhas de fluxo da Estrutura Assimétrica após simulação em regime permanente. ....	121
<b>Figura 4.42</b> – Valores de indução magnética obtidos através do FEMM para a Estrutura Assimétrica em regime permanente. ....	121
<b>Figura 4.43</b> – Resultados de Simulação obtidos através do FEMM para a Estrutura Assimétrica em regime permanente. ....	122
<b>Figura 4.44</b> – Linhas de fluxo da Estrutura Simétrica após simulação em regime permanente. ....	122
<b>Figura 4.45</b> – Valores de indução magnética obtidos através do FEMM para a Estrutura Simétrica em regime permanente. ....	123
<b>Figura 4.46</b> – Resultados de Simulação obtidos através do FEMM para a Estrutura Simétrica em regime permanente. ....	123
<b>Figura 4.47</b> – Linhas de fluxo da Estrutura Assimétrica após simulação durante um defeito. ....	124
<b>Figura 4.48</b> – Valores de indução magnética obtidos através do FEMM para a Estrutura Assimétrica durante um defeito. ....	124
<b>Figura 4.49</b> – Linhas de fluxo da Estrutura Simétrica após simulação durante um defeito. ....	125
<b>Figura 4.50</b> – Valores de indução magnética obtidos através do FEMM para a Estrutura Simétrica durante um defeito. ....	125
<b>Figura 6.1</b> - Forma de onda das tensões no Ponto P0(○) e na Barra 8,5km (□) – SLM-01C3 – Ano 1. ....	147

<b>Figura 6.2</b> - Forma de onda das tensões no Ponto P0(○) e na Barra 8,5km (□) – SLM-01C3 – Ano 2. ....	147
<b>Figura 6.3</b> - Forma de onda das tensões no Ponto P0(○) e na Barra 8,5km (□) – SLM-01C3 – Ano 3. ....	148
<b>Figura 6.4</b> - Forma de onda das tensões no Ponto P0(○) e na Barra 8,5km (□) – SLM-01C3 – Ano 4. ....	148
<b>Figura 6.5</b> - Forma de onda das tensões no Ponto P0(○) e na Barra 8,5km (□) – SLM-01C3 – Ano 5. ....	148
<b>Figura 6.6</b> - Forma de onda das tensões no Ponto P0(○) e na Barra 8,5km (□) – SLM-01C3 – Ano 6. ....	148
<b>Figura 6.7</b> - Forma de onda das tensões no Ponto P0(○) .....	148
<b>Figura 6.8</b> - Forma de onda das tensões no Ponto P0(○) e na Barra 8,5km (□) – SLM-01C3 – Ano 8. ....	148
<b>Figura 6.9</b> - Forma de onda das tensões no Ponto P0(○) .....	149
<b>Figura 6.10</b> - Forma de onda das tensões no Ponto P0(○) e na Barra 14,5km (□) –ITA-03 – Ano 2.....	149
<b>Figura 6.11</b> - Forma de onda das tensões no Ponto P0(○) e na Barra 14,5km (□) –ITA-03 – Ano 3.....	149
<b>Figura 6.12</b> - Forma de onda das tensões no Ponto P0(○) e na Barra 14,5km (□) –ITA-03 – Ano 4.....	149
<b>Figura 6.13</b> - Forma de onda das tensões no Ponto P0(○) e na Barra 14,5km (□) –ITA-03 – Ano 5.....	149
<b>Figura 6.14</b> - Forma de onda das tensões no Ponto P0(○) e na Barra 14,5km (□) –ITA-03 – Ano 6.....	149
<b>Figura 6.15</b> - Forma de onda das tensões no Ponto P0(○) e na Barra 14,5km (□) –ITA-03 – Ano 7.....	150
<b>Figura 6.16</b> - Forma de onda das tensões no Ponto P0(○) e na Barra 14,5km (□) –ITA-03 – Ano 8.....	150
<b>Figura 6.17</b> - Forma de onda das tensões no Ponto P0(○) e na Barra 14,5km (□) –ITA-03 – Ano 9.....	150
<b>Figura 6.18</b> - Forma de onda das tensões no Ponto P0(○) e na Barra 14,5km (□) –ITA-03 – Ano 10.....	150
<b>Figura 6.19</b> - Forma de onda da tensão no BCS para a Arquitetura ARMTRS – B (antes, durante e depois de um defeito) – SLM-01C3. ....	150
<b>Figura 6.20</b> – Forma de onda da corrente no RNS principal para a Arquitetura ARMTRS – B (antes, durante e depois de um defeito) – SLM01C3. ....	150
<b>Figura 6.21</b> – Forma de onda da tensão no BCS para a Arquitetura ARMTRS – C (antes, durante e depois de um defeito) – SLM-01C3. ....	151
<b>Figura 6.22</b> – Forma de onda da corrente no RNS para a Arquitetura ARMTRS – C (antes, durante e depois de um defeito) – SLM-01C3. ....	151
<b>Figura 6.23</b> - Forma de onda da tensão no BCS para a Arquitetura ARMTRS – D (antes, durante e depois de um defeito) – SLM-01C3. ....	151
<b>Figura 6.24</b> – Forma de onda da corrente no RNS principal para a Arquitetura ARMTRS – D (antes, durante e depois de um defeito) – SLM-01C3. ....	151
<b>Figura 6.25</b> - Forma de onda da tensão no BCS para a Arquitetura ARMTRS – E (antes, durante e depois de um defeito) – SLM-01C3. ....	151
<b>Figura 6.26</b> - Forma de onda da corrente no RNS principal para a Arquitetura ARMTRS – E (antes, durante e depois de um defeito) – SLM-01C3. ....	151

<b>Figura 7.1</b> – Desenho das dimensões físicas de projeto do protótipo de bancada 380V para a Estrutura Assimétrica (todas as unidades estão em milímetros). .....	181
<b>Figura 7.2</b> – Desenho da arquitetura dos enrolamentos do protótipo de bancada 380V para a Estrutura Assimétrica (todas as unidades estão em milímetros). .....	182
<b>Figura 7.3</b> – Desenho das dimensões físicas de projeto do protótipo de bancada 380V para a Estrutura Assimétrica (todas as unidades estão em milímetros). .....	183
<b>Figura 7.4</b> – Desenho da arquitetura dos enrolamentos do protótipo de bancada 380V para a Estrutura Assimétrica (todas as unidades estão em milímetros). .....	183
<b>Figura 7.5</b> – (a) Curva de magnetização ( $B \times H$ ) e (b) Curva de perdas magnéticas. ....	184
<b>Figura 7.6</b> - Característica $v \times i$ da impedância equivalente do sistema. ....	186
<b>Figura 7.7</b> - Característica $v \times i$ da carga. ....	187
<b>Figura 7.8</b> - Característica $v \times i$ da defeito. ....	188
<b>Figura 7.9</b> - Característica $v \times i$ do BCS. ....	189
<b>Figura 7.10</b> - Característica $v \times i$ do RNS para a Estrutura Assimétrica. ....	191
<b>Figura 7.11</b> - Característica $\lambda \times i$ do RNS para a Estrutura Assimétrica. ....	192
<b>Figura 7.12</b> - Característica $v \times i$ do RNS para a Estrutura Simétrica. ....	193
<b>Figura 7.13</b> - Característica $\lambda \times i$ do RNS para a Estrutura Simétrica. ....	193
<b>Figura 7.14</b> - Característica $v \times i$ do RLS para a Estrutura Assimétrica. ....	195
<b>Figura 7.15</b> - Característica $v \times i$ do RLS para a Estrutura Simétrica. ....	196
<b>Figura 7.16</b> – Curva $\lambda \times i$ usada para a modelagem dos protótipos com elemento type 96 sem dualidade eletromagnética – ( $\square$ ) Estrutura Assimétrica e ( $\diamond$ )Estrutura Simétrica. ....	197
<b>Figura 7.17</b> – Curva de histerese do protótipo de bancada. ....	197
<b>Figura 7.18</b> – Característica $\lambda \times i$ – Para a Estrutura Assimétrica com dualidade eletromagnética – ( $\diamond$ ) Retorno, ( $\square$ ) Jugo 1, ( $\Delta$ ) Jugo 2 e ( $x$ ) RNS – elemento type 98. ....	198
<b>Figura 7.19</b> - Característica $\lambda \times i$ – Para a Estrutura Assimétrica com dualidade eletromagnética – ( $\diamond$ ) Retorno, ( $\square$ ) Jugo 1, ( $\Delta$ ) Jugo 2 e ( $x$ ) RNS elemento type 96 . ....	198
<b>Figura 7.20</b> – Característica $\lambda \times i$ – Para a Estrutura Simétrica com dualidade eletromagnética – ( $\diamond$ ) Retorno, ( $\square$ ) Jugo 1, ( $\Delta$ ) Jugo 2 e ( $x$ ) RNS – elemento type 98. ....	198
<b>Figura 7.21</b> - Característica $\lambda \times i$ – Para a Estrutura Simétrica com dualidade eletromagnética – ( $\diamond$ ) Retorno, ( $\square$ ) Jugo 1, ( $\Delta$ ) Jugo 2 e ( $x$ ) RNS elemento type 96 . ....	199

## Lista de Tabelas

<b>Tabela 2.1</b> – Configuração do Sistema Elétrico trifásico com cargas distribuídas – Alimentador – SLM - 01C3.....	6
<b>Tabela 2.2</b> – Configuração do Sistema Elétrico trifásico com cargas distribuídas – Alimentador – ITA- 03.....	9
<b>Tabela 2.3</b> – Pontos de entrega ou conexão em Tensão Nominal superior a 1 kV e inferior a 69 kV, conforme Resolução ANEEL N° 505, de 26.11.2011. ....	11
<b>Tabela 2.4</b> – Valores da tensão nas barras de cargas antes e depois da compensação série – SLM-01C3.....	13
<b>Tabela 2.5</b> – Valores da tensão nas barras de cargas antes e depois da compensação série – ITA-03.....	16
<b>Tabela 2.6</b> – Regulação de Tensão promovida pelo ARMTRS para diferentes situações de cargas - SLM -01C3. ....	18
<b>Tabela 2.7</b> – Regulação de Tensão promovida pelo ARMTRS para diferentes situações de cargas - ITA-01C3. ....	19
<b>Tabela 2.8</b> – Corrente Fundamental e harmônico nas fases sãs devido a um curto-circuito monofásico na fase A, a 8,5km do ponto de suprimento, com ARMTRS – SLM-01C3. ....	26
<b>Tabela 2.9</b> - Corrente Fundamental e harmônico nas fases sãs devido a um curto-circuito monofásico na fase A, a 14,5km do ponto de suprimento, com ARMTRS – ITA-03. ..	27
<b>Tabela 2.10</b> - Corrente Fundamental e harmônico na fase sã (C) devido a um curto-circuito bifásico com terra entre as fases A e B, a 8,5km do ponto de suprimento, com ARMTRS – SLM-01C3.....	35
<b>Tabela 2.11</b> - Corrente Fundamental e harmônico na fase sã (C) devido a um curto-circuito bifásico com terra entre as fases A e B, a 14,5km do ponto de suprimento, com ARMTRS – ITA-03. ....	35
<b>Tabela 2.12</b> – Corrente no BCS e em cada célula durante um curto bifásico com a terra entre as fases A e B – SLM-01C3. ....	37
<b>Tabela 2.13</b> – Corrente no BCS e em cada célula durante um curto bifásico com a terra entre as fases A e B – ITA-03. ....	38
<b>Tabela 2.14</b> – Corrente no BCS e em cada célula durante um curto trifásico nas três fases – SLM-01C3.....	43
<b>Tabela 2.15</b> – Corrente no BCS e em cada célula durante um curto trifásico nas três fases – ITA-03.....	44
<b>Tabela 2.16</b> – Composição probabilística entre o tipo das faltas e sua duração. ....	46
<b>Tabela 2.17</b> – Tensão em pu a montante do ARMTRS durante um curto-circuito monofásico na fase A a jusante do ARMTRS – SLM-01C3.....	47
<b>Tabela 2.18</b> – Tensão em pu a montante do ARMTRS durante um curto-circuito monofásico na fase A a jusante do ARMTRS – ITA-03 (Projeto sem ajuste).....	48
<b>Tabela 2.19</b> – Tensão em pu a montante do ARMTRS durante um curto-circuito monofásico na fase A a jusante do ARMTRS – ITA-03. ....	50
<b>Tabela 2.20</b> – Resultados obtidos para os cinco tipos de arquitetura do ARMTRS. ....	53
<b>Tabela 3.1</b> – Alimentador – SLM - 01C3.....	63
<b>Tabela 3.2</b> – Curva de magnetização com 48 ponto.....	63
<b>Tabela 3.3</b> - Fatores de Forma para Seção Circular e números de steps.....	68
<b>Tabela 3.4</b> – Indução no RLS ao longo dos anos. ....	75
<b>Tabela 3.5</b> – Densidade de corrente no RLS ao longo dos anos. ....	76

<b>Tabela 3.6</b> – Valor de <i>K</i> para bobinas curta. ....	80
<b>Tabela 3.7</b> - Valor de <i>K</i> para bobinas longas. ....	82
<b>Tabela 4.1</b> – Dados do Sistema para experimento e simulação. ....	96
<b>Tabela 4.2</b> – Comparação dos resultados experimentados e simulados. ....	109
<b>Tabela 4.3</b> – Comparação dos resultados experimentados e simulados com dualidade eletromagnética. ....	115
<b>Tabela 6.1</b> – Características do Sistema de distribuição – 13,8kV – SLM-01C3. ....	129
<b>Tabela 6.2</b> – Características do Sistema de distribuição – 13,8kV – ITA-03. ....	133
<b>Tabela 7.1</b> – Parâmetros elétricos do Capacitor. ....	181
<b>Tabela 7.2</b> - Curva <i>B x H</i> e de perdas fornecida pelo fabricante com 29 pontos. ....	184
<b>Tabela 7.3</b> – Resultado das medidas do ensaio para obter a reatância equivalente do sistema. ....	185
<b>Tabela 7.4</b> – Resultado das medidas do ensaio para obter a resistência que representa a carga do sistema. ....	186
<b>Tabela 7.5</b> - Resultado das medidas do ensaio para obter a resistência que representa o defeito. ....	187
<b>Tabela 7.6</b> - Resultado das medidas do ensaio para obter a reatância capacitiva do BCS. ....	189
<b>Tabela 7.7</b> – Resultados das medidas do ensaio para obter a resistência do RNS para a Estrutura Assimétrica. ....	189
<b>Tabela 7.8</b> – Resultados das medidas do ensaio para obter a resistência do RNS para a Estrutura Simétrica. ....	190
<b>Tabela 7.9</b> – Resultado das medidas do ensaio para obter as perdas totais no ferro do RNS. ....	190
<b>Tabela 7.10</b> – Resultado das medidas do ensaio para obter as características $\lambda x i$ e $v x i$ do RNS da Estrutura Assimétrica. ....	190
<b>Tabela 7.11</b> – Resultado das medidas do ensaio para obter as características $\lambda x i$ e $v x i$ do RNS da Estrutura Simétrica. ....	192
<b>Tabela 7.12</b> – Resultados das medidas do ensaio para obter a resistência do RLS para a Estrutura Assimétrica. ....	194
<b>Tabela 7.13</b> – Resultados das medidas do ensaio para obter a resistência do RLS para a Estrutura Simétrica. ....	194
<b>Tabela 7.14</b> – Resultado das medidas do ensaio para obter a indutância dos RLS do ARMTRS para a Estrutura Assimétrica. ....	194
<b>Tabela 7.15</b> – Resultado das medidas do ensaio para obter a indutância dos RLS do ARMTRS para a Estrutura Simétrica. ....	195
<b>Tabela 7.16</b> – Resultados das medidas do ensaio para auto-regulação da carga conectada a jusante do ARMTRS. ....	199

## Lista de Abreviaturas

ARMTRS	Auto-Regulador Magnético de Tensão a Reator Saturado
CELPE	Companhia Energética de Pernambuco
P&D	Projeto e Desenvolvimento
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
DEE	Departamento de Engenharia Elétrica
LDSP	Laboratório Digital de Sistema de Potência
BCS	Banco de Capacitor Série
RLS	Reator Linear Série
RNS	Reator Naturalmente Saturado
EMTP-ATP	Electro-Magnetic Transient Program - Alternative Transient Program
SLM-01C3	Alimentador de São Lourenço da Mata
ITA-03	Alimentador de Itamaracá
COMPESA	Companhia Pernambucana de Saneamento
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
LTC	Load Tap Changers
THD	Total Harmonic Distortion
GEC	General Electric Company
FEMM	Finite Element Method Magnetics

## Lista de Símbolos

$\mathcal{B}$	Densidade de fluxo magnético [T]
$\mathcal{B}_S$	Valor de densidade de fluxo magnético de início de saturação [T]
$\mathcal{B}_{MAX}$	Valor de pico da densidade de fluxo magnético [T]
$\mathcal{H}$	Campo magnético [A/m]
$\lambda$	Fluxo concatenado [Wb·esp]
N	Número de espiras
$f$	Frequência do sistema [Hz]
$f_e$	Fator de empilhamento
$\omega$	Frequência angular [rad/s]
$t$	Tempo [s]
$\mathcal{H}_C$	Campo magnético coercitivo [A/m]
$F_{mmg}$	Força magnetomotriz [esp·A]
$\mu_0$	Permeabilidade magnética do ar [T.m/A]
$\mu_r$	Permeabilidade relativa do meio
$g$	Comprimento do entreferro [mm]
$A$	Área da seção transversal do circuito magnético do RNS [m <sup>2</sup> ]
$A_g$	Área geométrica da seção transversal do circuito magnético do RNS [m <sup>2</sup> ]
$l$	Comprimento do caminho magnético médio do circuito magnético do RNS [m]
$i$	Corrente [A]
$S_{cc3\phi}$	Potência de curto-circuito trifásico [MVA]
$X_{Cap\_Liquida}$	Reatância capacitiva líquida do sistema [ $\Omega$ ]
$X_{RLS}$	Reatância do Reator Linear Série [ $\Omega$ ]
$X_{Ar}$	Reatância do Reator de Núcleo de Ar [ $\Omega$ ]
$X_{BCS}$	Reatância do Banco de Capacitor Série [ $\Omega$ ]
$L_m$	Indutância de magnetização do Reator Naturalmente Saturado [H]
$L_{sat}$	Indutância de saturação do Reator Naturalmente Saturado [H]
$\phi$	Fluxo magnético [Wb]



$\Phi_{m\acute{a}x}$	Fluxo magnético máximo [Wb]
$R_{BOB}$	Resistência da bobina [ $\Omega$ ]
$\rho$	Resistividade do cobre [ $\Omega.m$ ]
$F_{Flux}$	<i>Fringing Flux</i>
$\mathfrak{R}$	Relutância [A/Wb]
$d$	Densidade de corrente [ $A/m^2$ ]
K	Fator de forma de Nagaoka

# CAPITULO 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1 - Considerações iniciais

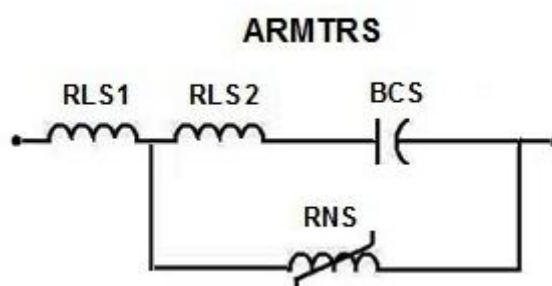
A oferta de energia elétrica com um elevado padrão de qualidade é um propósito permanente da Companhia Energética de Pernambuco – CELPE, não somente para cumprimento dos índices impostos pelo contrato de concessão firmado com o poder público, mas também pela satisfação de oferecer aos clientes um produto que atenda a todos os requisitos exigidos pelas normas vigentes. Com esse intuito, todos os fenômenos elétricos que incidem no sistema de distribuição operado pela CELPE e produzem variações significativas na tensão da rede são cuidadosamente investigados com vistas à identificação das medidas capazes de atenuar adequadamente os seus efeitos. Orientada por esse paradigma, a CELPE firmou um contrato de projeto de Pesquisa e Desenvolvimento – P&D do período 2009-2010 com a Universidade Federal de Pernambuco titulado *Auto-Regulador Magnético de Tensão para Redes Primária de Distribuição a Reator Saturado; Protótipo Conceitual e Experimental*, para o desenvolvimento de um dispositivo capaz de não somente regular a tensão da rede elétrica, como também limitar a corrente de curto-circuito e controlar os afundamentos e elevação de tensão dos consumidores conectados a montante durante a ocorrência de um defeito a jusante do equipamento.

O Auto-Regulador Magnético de Tensão para Redes Primária de Distribuição a Reator Saturado, de agora por diante simplesmente ARMTRS, a ser instalado na rede elétrica da CELPE é composto basicamente de três elementos:

- Banco de capacitores série (BCS), destinado à compensação série da rede;
- Reator linear série (RLS) com a finalidade de limitar a corrente de curto-circuito produzida pela incidência de defeitos ou oriundas de sobrecargas e controlar o afundamento e elevação da tensão;

- Reator Naturalmente Saturado (RNS), o qual exerce a função de controle do banco de capacitores, removendo esse elemento quando da incidência de um defeito.

Os elementos citados estão interligados entre si conforme o arranjo mostrado na Figura 1.1, onde o RLS e o BCS encontram-se conectados em série e o RNS em paralelo.



**Figura 1.1** – *Arquitetura do ARMTRS.*

Com essa arquitetura, o ARMTRS apresenta o seguinte modo operativo quando conectada em série com uma rede de transmissão:

- Em condições normais de funcionamento, a corrente solicitada pela rede é insuficiente para estabelecer um regime de saturação no RNS, ou seja, o mesmo opera aos moldes de uma chave aberta. Nessas circunstâncias, o conjunto formado pelo RLS e o BCS oferece uma reatância líquida capacitiva, prestando-se o dispositivo como um compensador série para a queda de tensão na rede;
- Na ocorrência de uma corrente elevada, devido a uma falha ou a um regime de sobrecarga, o RNS entra em saturação, produzindo um curto circuito nos terminais do BCS e parte do RLS. A reatância líquida do ARMTRS torna-se agora, indutiva, e esse dispositivo passa não só a exercer a função de limitador de corrente de curto como também a controlar o afundamento e elevação das tensões das cargas conectada a montante dele.

O programa EMTP-ATP foi utilizado como ferramenta para modelagem e análise do ARMTRS, por dispor dos elementos necessários para modelar seus componentes.

Neste trabalho serão expostas todas as etapas do dimensionamento dos componentes do ARMTRS, assim como todos os resultados de simulação em redes reais

de distribuição e resultados experimentais obtidos com modelos reduzidos para laboratório do ARMTRS, tomando-se como base os estudos desenvolvidos pelo Laboratório Digital de Sistemas de Potência – LDSP da Universidade Federal de Pernambuco – UFPE referentes à utilização de reatores naturalmente saturados no sistema elétrico.

## 1.2 – Objetivos pretendidos

O presente trabalho tem os seguintes objetivos:

- Apresentar o desenvolvimento completo do dimensionamento do ARMTRS, considerando o projeto de todos os seus componentes, inicialmente proposto em [1], avaliando o seu desempenho como regulador de tensão em regime permanente, limitador de corrente de curto e controlador de afundamento de tensão em regime transitório de operação;
- Efetuar estudos para a fabricação de um cabeça de série a ser instalado em um ramal de distribuição trifásico em 13,8 kV da CELPE a ser construído no projeto de P&D do ciclo 2011-2012 titulado como *Auto-Regulador Magnético de tensão a Reator Naturalmente Saturado – ARMTRS, em 13,8kV – Cabeça de Série*;
- Apresentar os resultados obtidos do projeto de P&D do ciclo 2009-2010 titulado como *Auto-Regulador Magnético de Tensão para Redes Primária de Distribuição a Reator Saturado - Protótipo Conceitual e Experimental*;

## 1.3 – Apresentação do trabalho

Este trabalho é dividido em 05 capítulos, conforme exposto:

- Capítulo 2 – Neste capítulo serão apresentadas todas as análises em regime permanente senoidal e transitório para redes reais de distribuição da CELPE em 13,8kV;

- Capítulo 3 – Neste capítulo são apresentados os cálculos usados no dimensionamento dos componentes do ARMTRS, assim como os desenhos de projetos;
- Capítulo 4 – Neste capítulo serão mostrados todos os resultados obtidos em laboratórios para protótipo de bancada do ARMTRS;
- Capítulo 5 – Apresenta as conclusões do trabalho, além de sugestão para trabalhos posteriores relativos ao tema;

## CAPITULO 2

### APLICAÇÃO DO ARMTRS EM REDES TRIFÁSICAS DE DISTRIBUIÇÃO EM 13,8 kV

Com o intuito de analisar o comportamento do ARMTRS em redes trifásicas de distribuição da CELPE na tensão de 13,8kV, foram realizadas simulações no programa EMTP-ATP para dois sistemas elétricos com cargas distribuídas ao longo dos alimentadores, denominados de SLM-01C3 e ITA-03 sendo esse tipo de sistema encontrado com maior frequência nas concessionárias de distribuição de energia elétrica.

Visando retratar o desequilíbrio de fases normalmente existente nos sistemas de distribuição de energia elétrica, foi considerado um desbalanço na carga de aproximadamente +5% e -5% entre as fases A e C, respectivamente.

#### 2.1 - Análise do sistema elétrico

##### 2.1.1 - Alimentador - SLM-01C3

O primeiro alimentador analisado, nomeado como SLM - 01C3, é mostrado na Figura 2.1 e cujas características estão descritas no Apêndice 6.1.

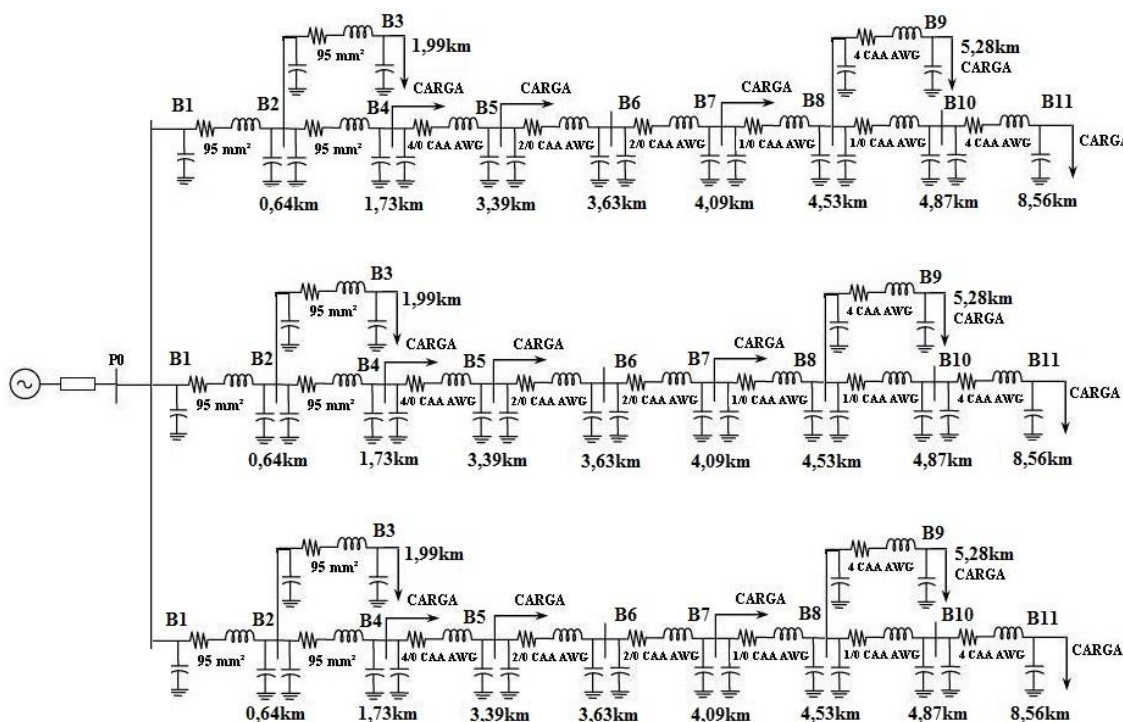


Figura 2.1 – Rede trifásica de distribuição em 13,8kV – SLM - 01C3.

A Representação eletrogeográfica do alimentador SLM-01C3 é mostrado na Figura 2.2 destacando-se a rede tronco, cuja extensão total é de aproximadamente 8,5 km apresentando cargas com características diversificadas ao longo de sua extensão.



**Figura 2.2 – Representação Eletrogeográfica – SLM-01C3.**

Para as análises em regime permanente e regime transitório de operação, o sistema foi modelado considerando os centros de carga distribuídos nas barras conforme mostrado na Tabela 2.1.

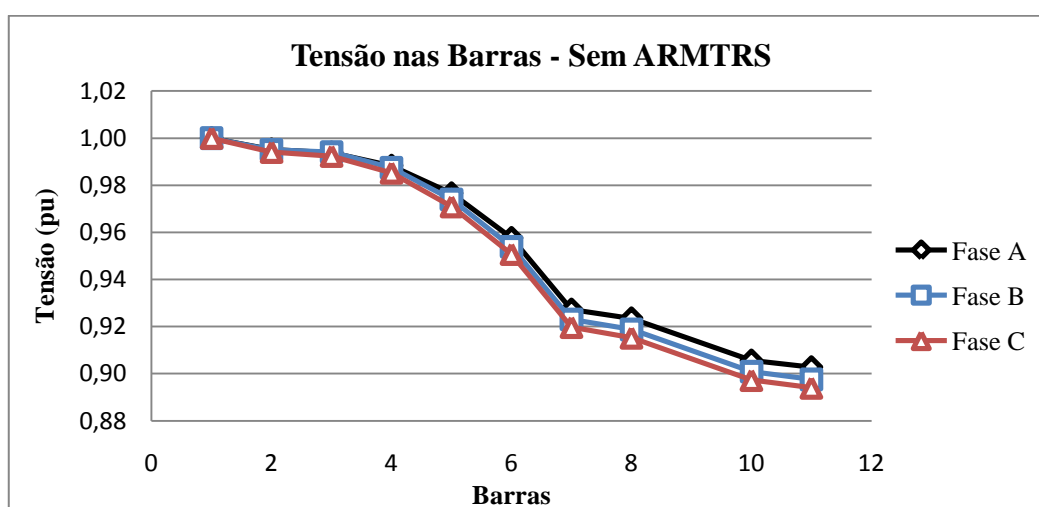
**Tabela 2.1 – Configuração do Sistema Elétrico trifásico com cargas distribuídas – Alimentador – SLM - 01C3.**

<i>Trecho</i>		<i>Cabo</i>	<i>I<sub>adm-Cabo</sub></i> (A)	<i>Distância</i> (km)	<i>Impedância da carga</i> (barra fim) ( $\Omega$ )	<i>Tensão na barra fim</i> (pu)
<i>Barra início</i>	<i>Barra Fim</i>					
1 (SE)	2	C-95	430	0,643	-	0,995
2	3	C-95	430	1,346	1264,4+j536,0	0,994
2	4	C-95	430	1,084	2012,1+j853,0	0,987
4	5	S-40	340	1,666	4947,8 +j2097,4	0,974
5	6	S-20	270	0,236	-	0,954
6	7	S-20	270	0,457	6399,1+j2712,7	0,923
7	8	S-10	230	0,4	-	0,919
8	9 (*)	S-04	140	0,75	201,5+j85,4	0,908
8	10	S-10	230	0,342	-	0,901
10	11	S-04	140	3,69	1350,1+j1350,1	0,898

(\*) COMPESA: S=2,0 MVA

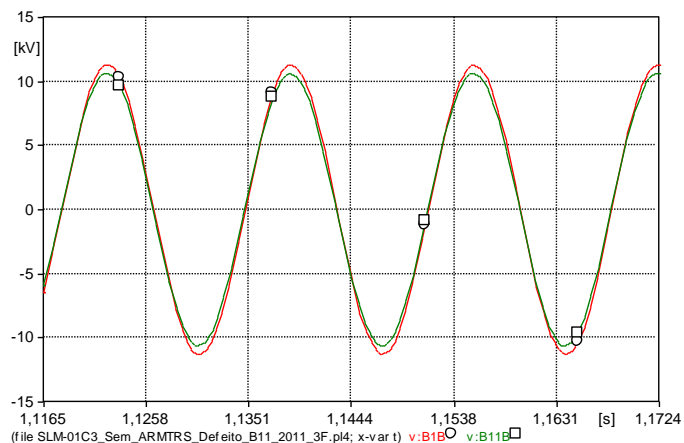
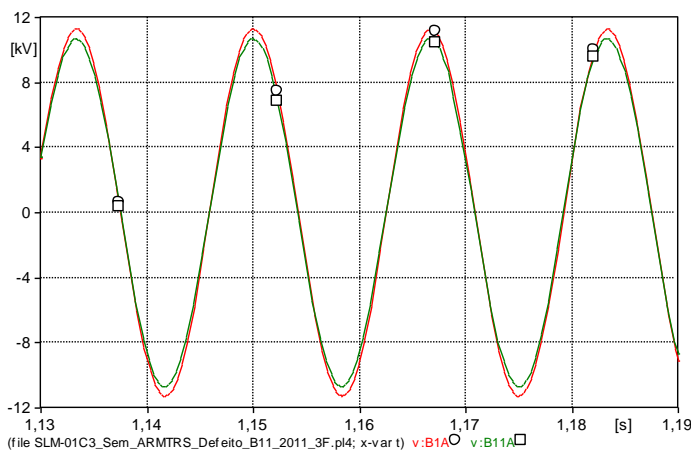
O sistema de alimentação está representado pelo seu equivalente de Thévenin na barra de 13,8kV (ponto P0) como mostra a Figura 2.1. Para essa configuração, a queda de tensão a 8,5km do alimentador é de aproximadamente 10% da tensão da barra P0, justificando a utilização de métodos para a regulação da tensão nesse ponto. O *script* desse sistema em ATP é mostrado no Apêndice 6.2.

A Figura 2.3 apresenta o perfil das tensões levantado com simulações realizadas em EMTP-ATP, para as condições inicialmente consideradas, em por-unidade (pu) da tensão na barra P0.

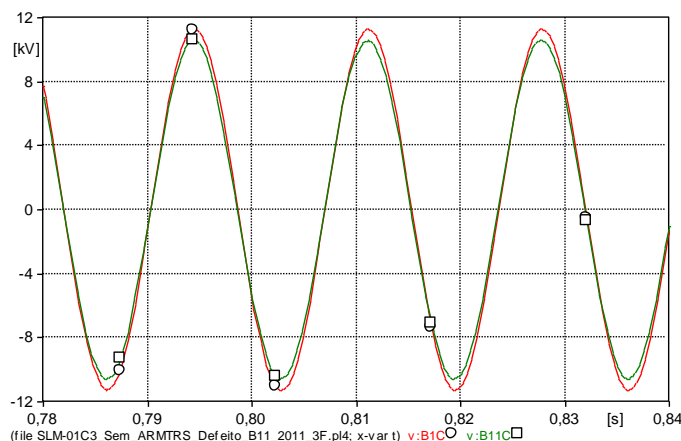


**Figura 2.3** – Perfil das tensões nas barras por unidade (pu) – SLM -01C3.

Já a Figuras 2.4 representa a forma de onda das tensões nas barras de suprimento e de carga.





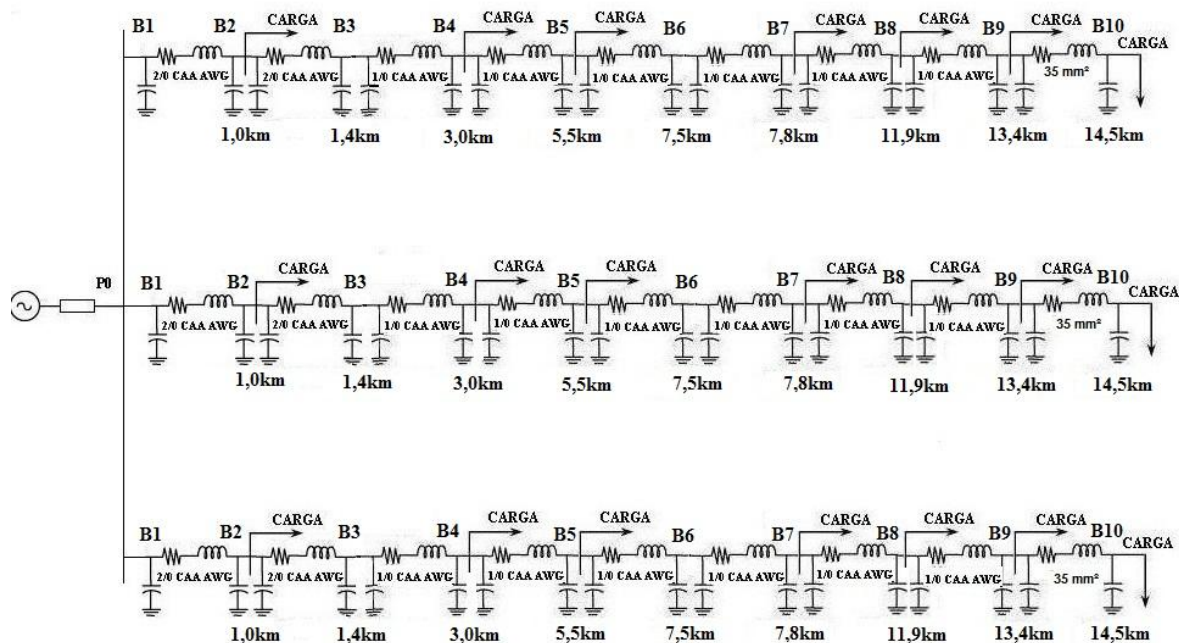


(c)

**Figura 2.4** – Forma de onda das tensões no Ponto P0(○) e na Barra 11 a 8,5km da fonte (□) – (a) Fase A; (b) Fase B e (c) Fase C – SLM - 01C3.

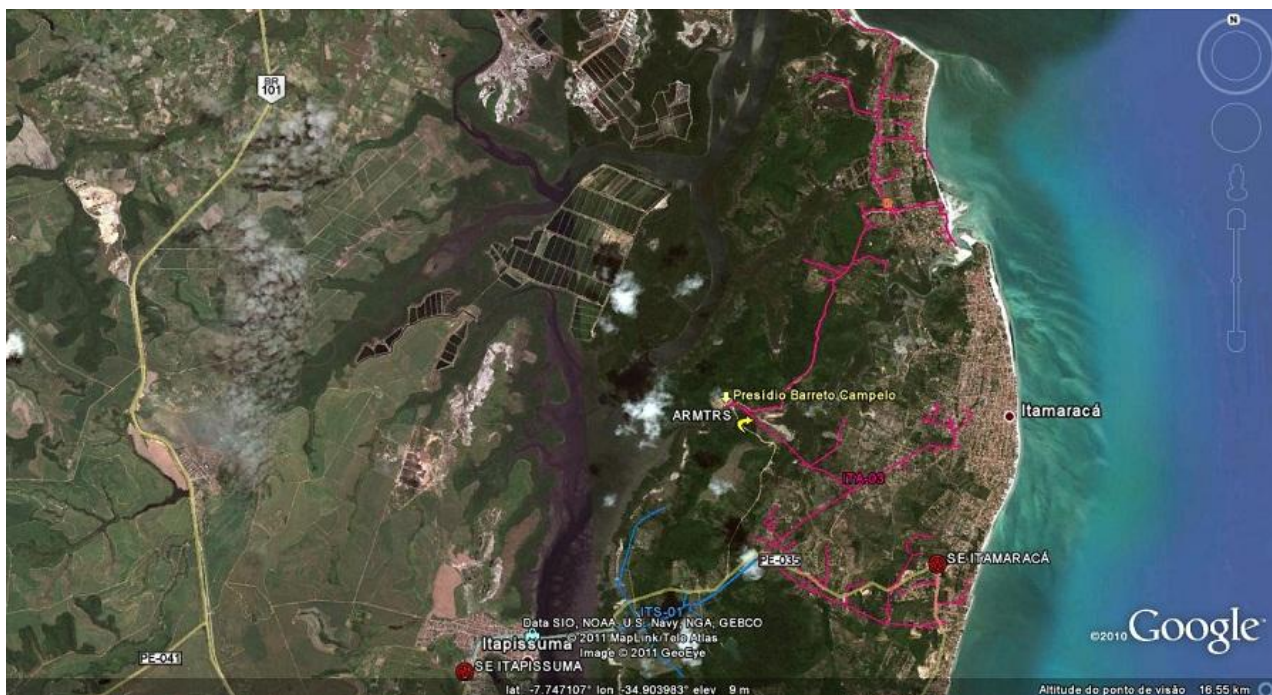
### 2.1.2 - Alimentador - ITA-03

O segundo alimentador analisado, nomeado como ITA-03, é mostrado na Figuras 2.5 e cujas características estão descritas no Apêndice 6.3.



**Figura 2.5** – Rede trifásica de distribuição em 13,8kV – ITA- 03.

A Representação eletrogeográfica do alimentador ITA-03 é mostrado na Figura 2.6 destacando-se a rede tronco, cuja extensão total é de aproximadamente 14,5km apresentando cargas com características diversificadas ao longo de sua extensão.



**Figura 2.6 – Representação Eletrográfica – ITA-03.**

Para as análises em regime permanente e regime transitório de operação, o sistema foi modelado considerando os centros de carga distribuídos nas barras conforme mostrado na Tabela 2.2.

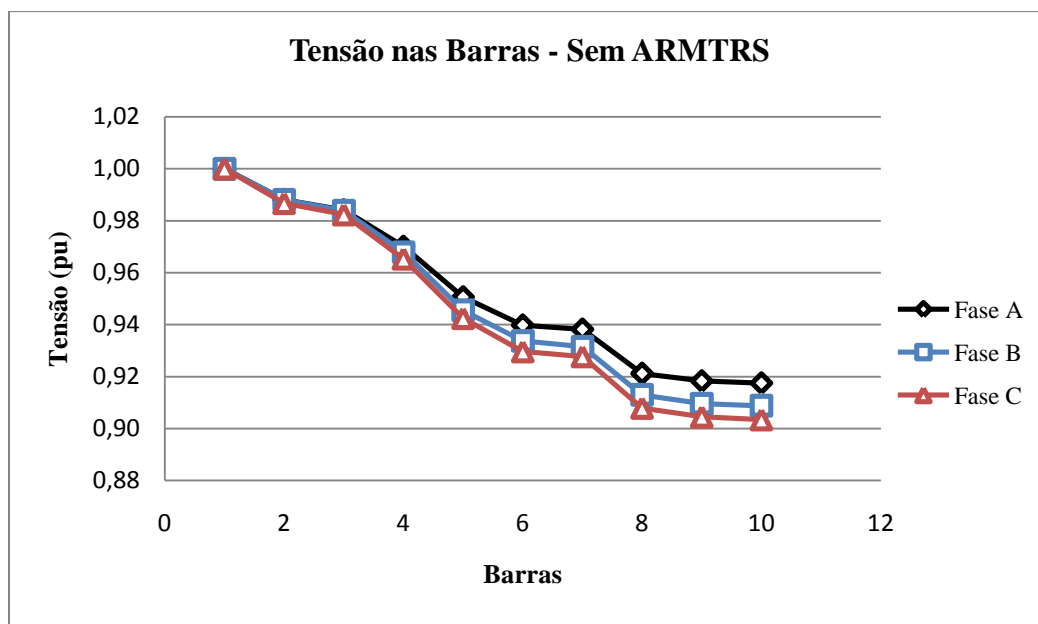
**Tabela 2.2 – Configuração do Sistema Elétrico trifásico com cargas distribuídas – Alimentador – ITA- 03.**

<b>Trecho</b>		<b>Cabo</b>	<b><math>I_{adm-Cabo}</math> (A)</b>	<b>Distância (km)</b>	<b>Impedância da carga (barra fim) (<math>\Omega</math>)</b>	<b>Tensão na barra fim (pu)</b>
<b>Barra início</b>	<b>Barra Fim</b>					
<b>1 (SE)</b>	<b>2</b>	S-20	270	1,0	879,6 + j372,9	0,988
<b>2</b>	<b>3</b>	S-20	270	0,4	-	0,984
<b>3</b>	<b>4</b>	S-10	230	1,6	1522,4 + j645,4	0,968
<b>4</b>	<b>5</b>	S-10	230	2,5	691,1 + j293	0,946
<b>5</b>	<b>6</b>	S-10	230	2,0	-	0,934
<b>6</b>	<b>7</b>	S-10	230	0,3	1275,4 + j540,7	0,932
<b>7</b>	<b>8</b>	S-10	230	4,1	718,9 + j304,8	0,913
<b>8</b>	<b>9</b>	S-10	230	1,5	1557,6 + j660,3	0,910
<b>9</b>	<b>10</b>	P-35	168	1,1	1869,2 + j792,4	0,909

O sistema de alimentação está representado pelo seu equivalente de Thévenin na barra de 13,8kV (ponto P0) como mostra a Figura 2.5. Para essa configuração, a queda de tensão a 14,5 km do alimentador é de aproximadamente 9% da tensão da barra P0,

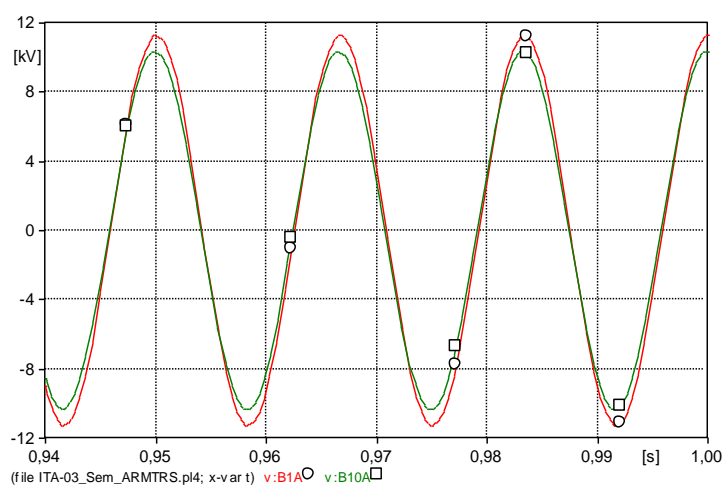
justificando a utilização de métodos para a regulação da tensão nesses pontos. O *script* para modelagem desse sistema em ATP é mostrado no Apêndice 6.4.

A Figura 2.7 apresenta o perfil das tensões levantado com simulações realizadas em EMTP-ATP, para as condições inicialmente consideradas, em por-unidade da tensão na barra P0.

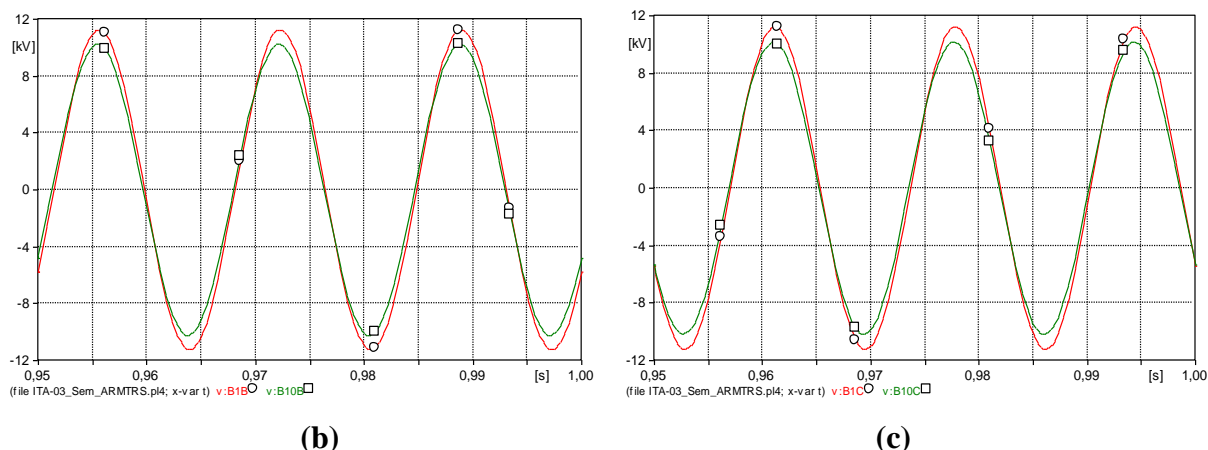


**Figura 2.7** – Perfil das tensões nas barras por unidade (pu) – ITA-03.

Já a Figura 2.8 representa a forma de onda das tensões nas barras de suprimento e de carga.



**(a)**



**Figura 2.8** – Forma de onda das tensões no Ponto P0(○) e na Barra B10 a 14,5km da fonte (□) – (a) Fase A; (b) Fase B e (c) Fase C – ITA - 03.

## 2.2 – Especificação do ponto para a instalação do ARMTRS

### 2.2.1 – Alimentador - SLM-01C3

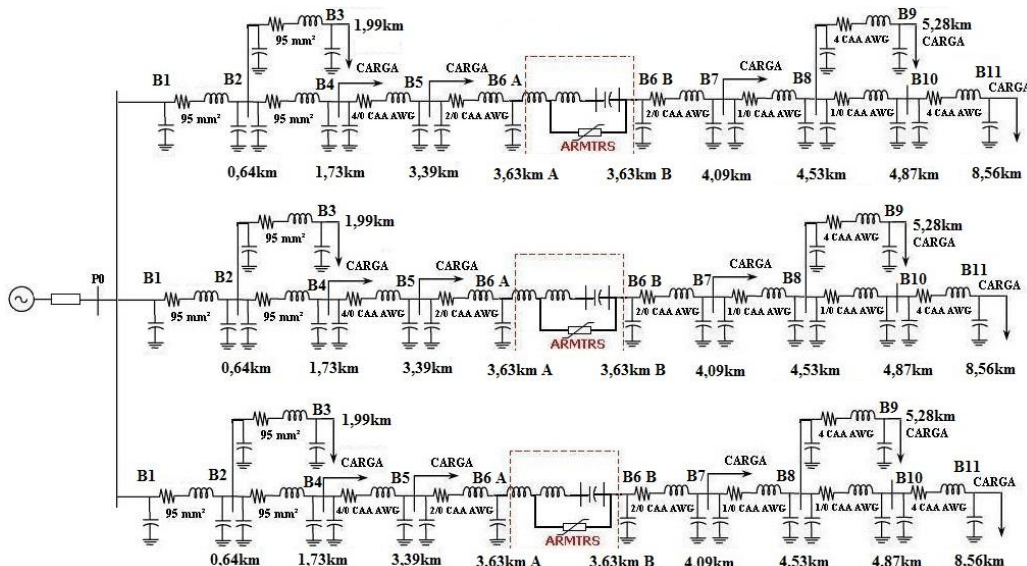
De modo a compensar a queda de tensão a 8,5km da fonte, um banco de capacitores série foi introduzido no sistema visando uma compensação série conforme descrito no capítulo 2 de [1].

A partir dos valores de tensão observados em cada barra, foi identificado como ponto para instalação do BCS a barra localizada a 3,6 km do ponto de suprimento, tendo em vista que nesse ponto já há um regulador de tensão como foi mostrado na Figura 2.2, e que para as condições de carregamento estabelecidas sem esse equipamento, a tensão nessa barra encontra-se em torno de 0,93 pu [2], ou seja, no limite inferior previsto para a faixa de tensão adequada descrita na Tabela 2.3.

**Tabela 2.3** – Pontos de entrega ou conexão em Tensão Nominal superior a 1 kV e inferior a 69 kV, conforme Resolução ANEEL N° 505, de 26.11.2011.

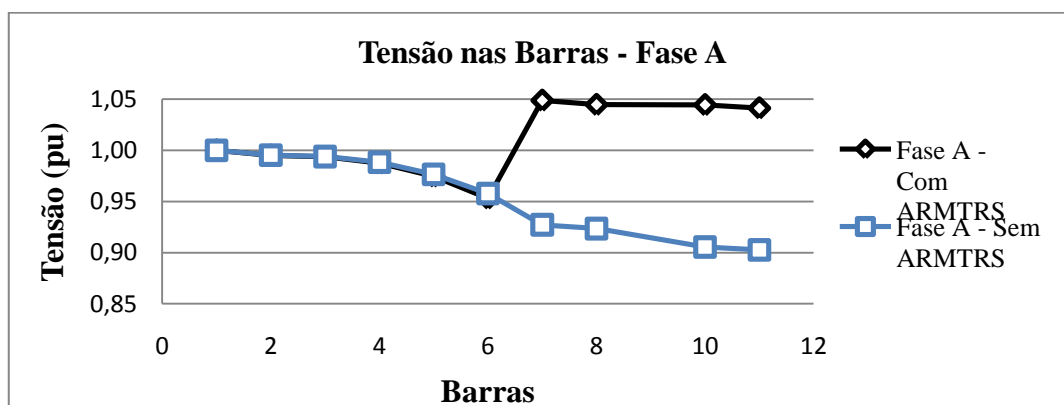
<b>Classificação da Tensão de Atendimento (TA)</b>	<b>Faixa de Variação da Tensão de Leitura (TL) em relação à Tensão Contratada (TC)</b>
<b>Adequada</b>	$0,93 TC \leq TL \leq 1,05 TC$
<b>Precária</b>	$0,90 TC \leq TL < 0,93 TC$
<b>Crítica</b>	$TL < 0,90 TC$ ou $TL > 1,05 TC$

Uma vez que o ARMTRS é composto por unidades monofásicas, deve-se considerar a instalação de equipamentos individuais em cada uma das fases do sistema trifásico, conforme mostra na Figura 2.9.

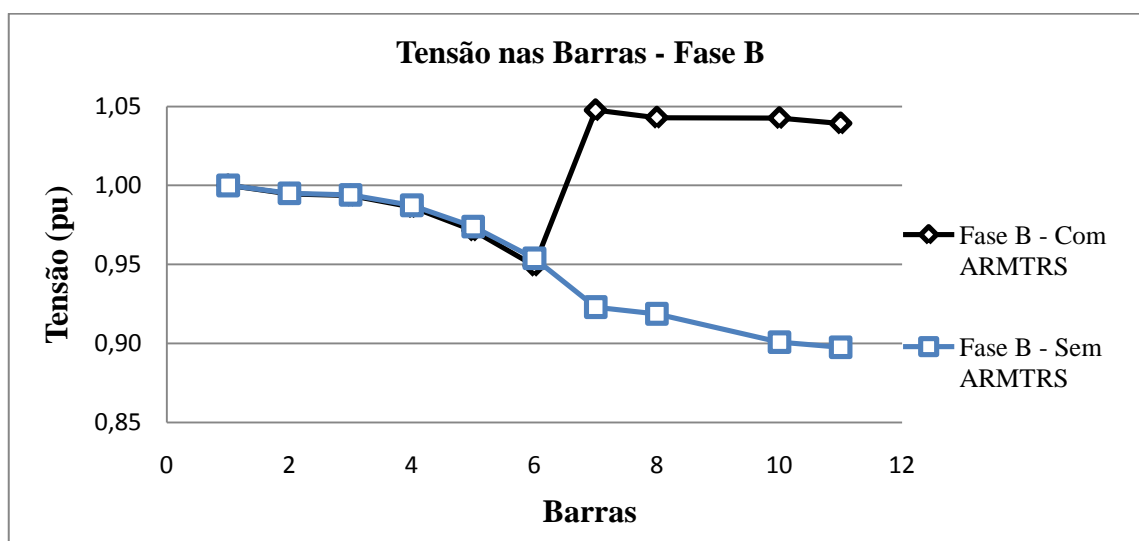


**Figura 2.9** – Sistema com a presença do ARMTRS - compensação série do sistema SLM-01C3.

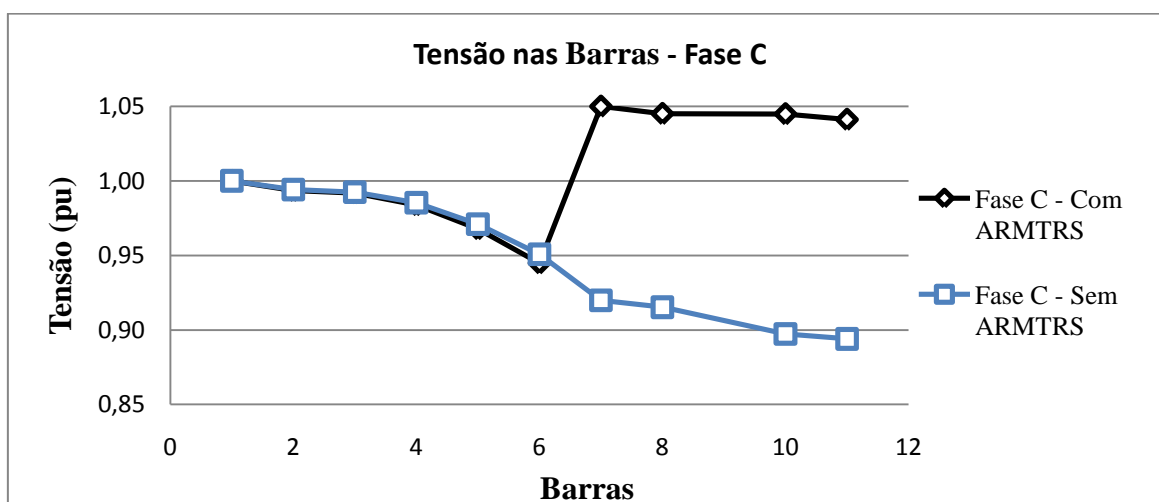
Conhecendo-se as tensões em cada ponto do sistema, verificou-se que o capacitor estaria submetido a uma tensão de  $0,92 \text{ kV}_{\text{RMS}}$  aplicada em seus terminais, e uma corrente de carga igual a  $115 \text{ A}_{\text{RMS}}$ . O valor da reatância capacitiva líquida,  $X_c$ , que o sistema necessita para elevar a tensão na barra de carga a níveis adequados é calculado pela lei de Ohm o que resulta em  $8\Omega$ . Nessa situação, o ganho de tensão obtido na fase B (fase de referência) com a compensação série foi de 14%, possibilitando a tensão de 1,04 pu na barra da carga. Nas Figuras 2.10, 2.11 e 2.12 são mostradas a compensação série nas três fases e na Tabela 2.4 os valores obtidos de tensão em por-unidade.



**Figura 2.10** – Perfil da tensão da fase A nas barras sem e com o ARMTRS em pu – SLM-01C3.



**Figura 2.11** – Perfil da tensão da fase B nas barras sem e com o ARMTRS em pu – SLM-01C3.

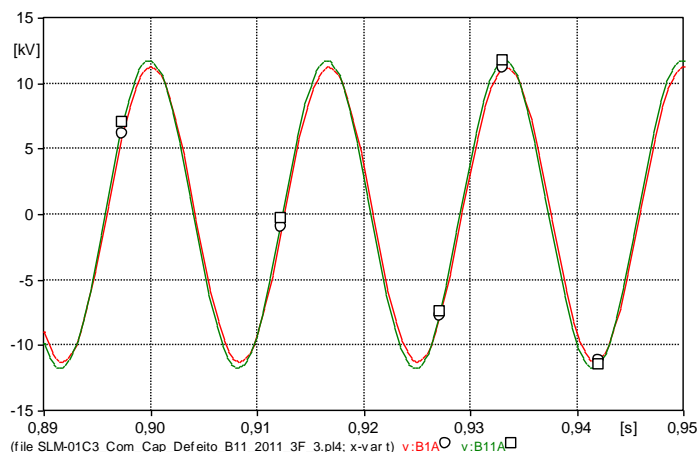


**Figura 2.12** – Perfil da tensão da fase C nas barras sem e com o ARMTRS em pu – SLM-01C3.

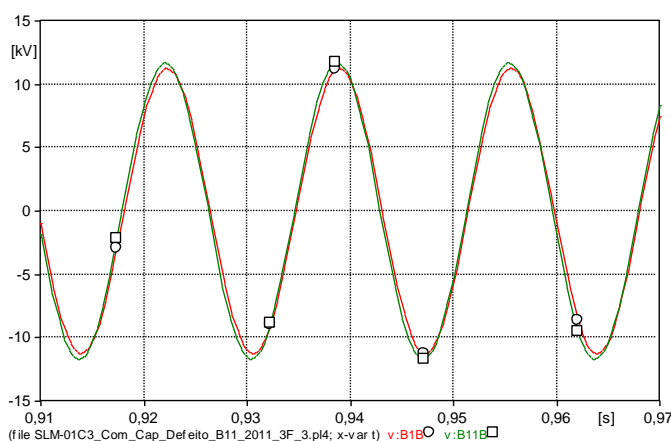
**Tabela 2.4** – Valores da tensão nas barras de cargas antes e depois da compensação série – SLM-01C3.

	<i>Tensão na Barra de Carga a 8,558km - Ramo Principal (pu)</i>		
	<i>Fase A</i>	<i>Fase B</i>	<i>Fase C</i>
<b>Sem ARMTRS</b>	0,90	0,90	0,89
<b>Com ARMTRS</b>	1,04	1,04	1,04

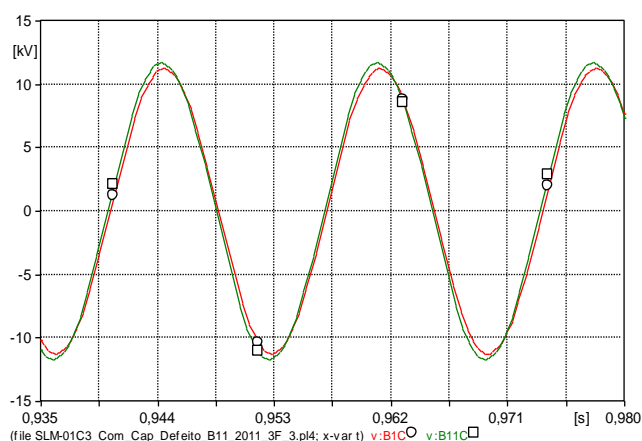
A Figura 2.13 mostra a forma de onda das tensões nas barras de suprimento e de carga.



(a)



(b)



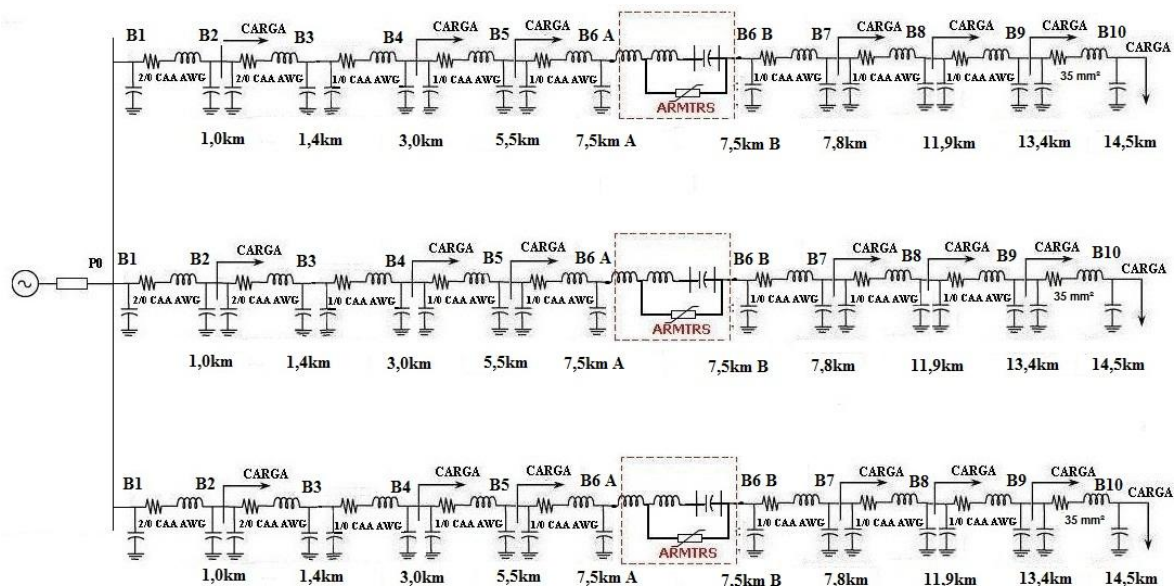
(c)

**Figura 2.13** – Forma de onda das tensões no Ponto P0(○) e na Barra 11 a 8,5km da fonte (□) – SLM – 01C3 – (a) Fase A; (b) Fase B e (c) Fase C.

### 2.2.2 – Alimentador – ITA-03

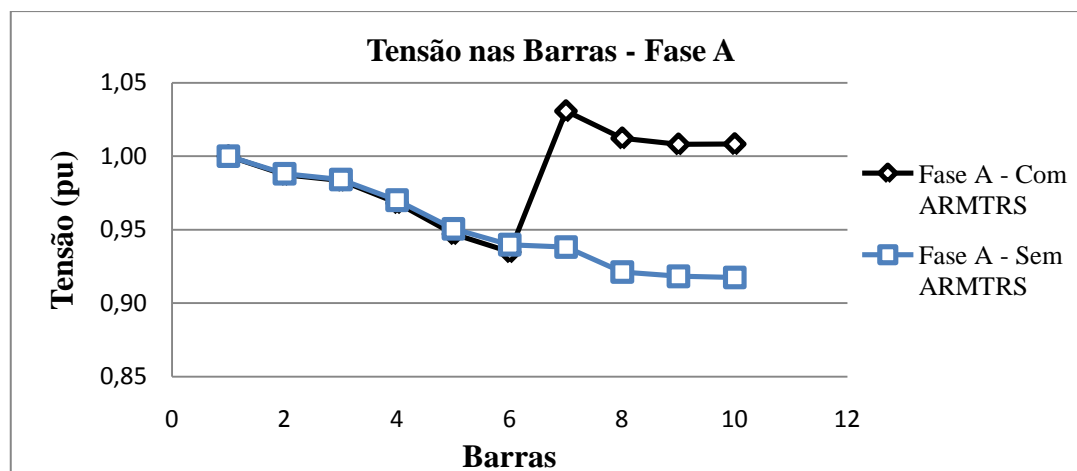
A partir dos valores de tensão observados em cada barra, foi identificado como ponto para instalação do BCS a barra localizada a 7,5 km do ponto de suprimento, tendo em vista que para as condições de carregamento estabelecidas sem esse equipamento, a tensão nessa barra encontra-se em torno de 0,91 pu, ou seja, abaixo do limite do previsto para a faixa de tensão adequada descrita na Tabela 2.3.

Uma vez que o ARMTRS é composto por unidades monofásicas, deve-se considerar a instalação de equipamentos individuais em cada uma das fases do sistema trifásico, conforme mostra na Figura 2.14.



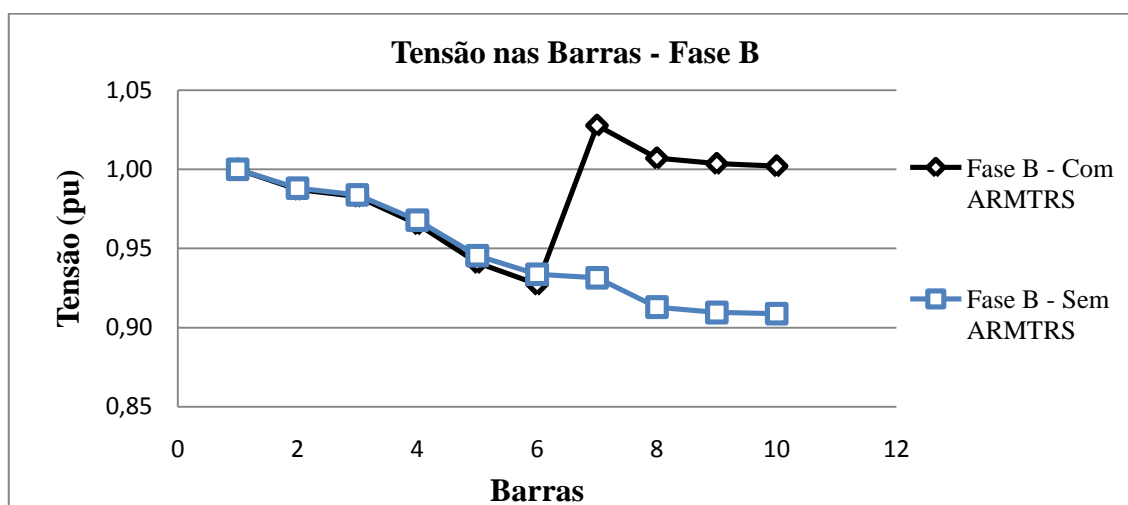
**Figura 2.14** – Sistema com a presença do ARMTRTS - compensação série do sistema ITA-03.

Conhecendo-se as tensões em cada ponto do sistema, verificou-se que o capacitor estaria submetido a uma tensão de  $0,89 \text{ kV}_{\text{RMS}}$  aplicada em seus terminais, e uma corrente de carga igual a  $69 \text{ A}_{\text{RMS}}$ . O valor da reatância capacitiva líquida,  $X_c$ , que o sistema necessita para elevar a tensão na barra de carga a níveis adequados é calculado pela lei de Ohm o que resulta em  $13 \Omega$ . Nessa situação, o ganho de tensão obtido na fase B (fase de referência) com a compensação série foi de 9% possibilitando a tensão de 1,00 pu na barra de carga. Nas Figuras 2.15, 2.16 e 2.17 são mostradas a compensação série nas três fases e na Tabela 2.5 os valores obtidos de tensão em por-unidade.

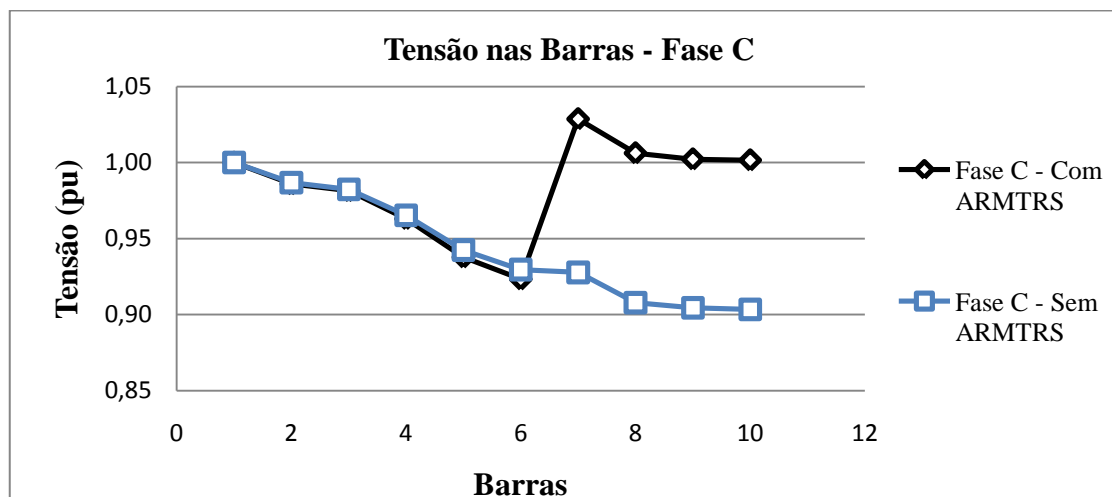


**Figura 2.15** – Perfil da tensão da fase A nas barras sem e com o ARMTRTS em pu – ITA-03.





**Figura 2.16** – Perfil da tensão da fase B nas barras sem e com o ARMTRS em pu – ITA-03.

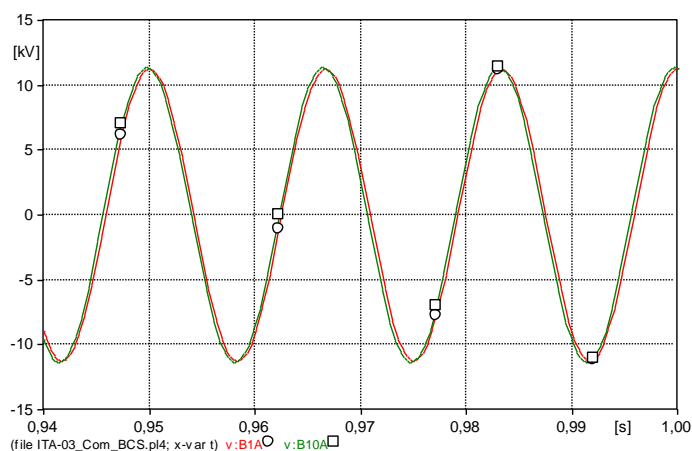


**Figura 2.17** – Perfil da tensão da fase C nas barras sem e com o ARMTRS em pu – ITA-03.

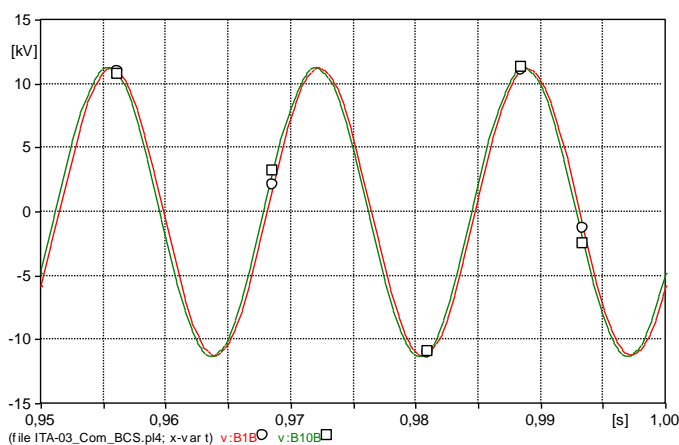
**Tabela 2.5** – Valores da tensão nas barras de cargas antes e depois da compensação série – ITA-03.

	<i>Tensão na Barra de Carga a 14,5km - Ramo Principal (pu)</i>		
	<i>Fase A</i>	<i>Fase B</i>	<i>Fase C</i>
<b>Sem ARMTRS</b>	0,92	0,91	0,90
<b>Com ARMTRS</b>	1,01	1,00	1,00

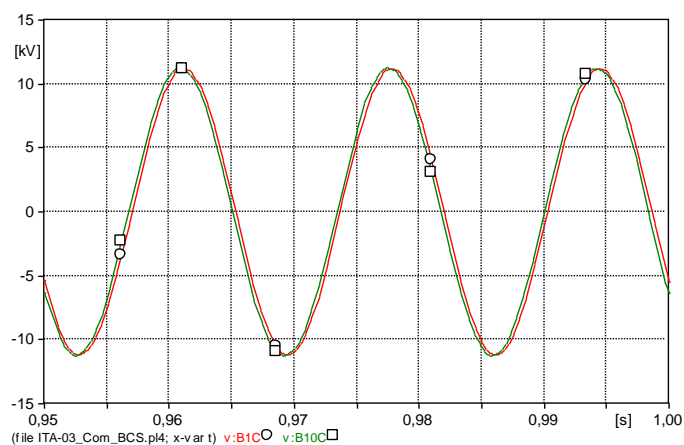
A Figura 2.18 mostra a forma de onda das tensões nas barras de suprimento e de carga.



(a)



(b)



(c)

**Figura 2.18** – Forma de onda das tensões no Ponto P0(○) e na Barra B10 a 14,5km da fonte (□) – (a) Fase A; (b) Fase B e (c) Fase C - ITA – 03.

## 2.3 – Análise do desempenho do ARMTRS no sistema CELPE

### 2.3.1 – Análise em regime permanente

Para a análise do ARMTRS em regime permanente senoidal, considera-se o sistema teste apresentado na Figura 2.9 para o alimentador de SLM-01C3 e o sistema apresentado na Figura 2.14 para o alimentador de ITA-03, respectivamente, com variações discretas de carga, de modo a simular situações diferentes de operação. Os roteiros em ATP utilizados para o estudo dessas situações são mostrados nos Apêndices 6.5 e 6.6, respectivamente.

De modo a avaliar o comportamento do ARMTRS frente às variações de carga em regime permanente, inicialmente, considera-se um carregamento referente a 100% da corrente de carga do sistema. Esse carregamento será incrementado com a taxa de crescimento de carga médio anual para cada alimentador que é de 5,36% (SLM-01C3) e 3,4% (ITA-03). A tensão no ponto P0 (barra de 13,8 kV da subestação) será mantida em 1,0 pu para todas as situações de carga, uma vez que esta pode ser regulada por transformadores dotados de LTC (“load tap changers”) ou por reguladores de tensão existentes na própria subestação.

Os resultados do desempenho do ARMTRS ao longo dos anos para o alimentador de SLM-01C3 são mostrados na Tabela 2.6. Conforme esperado, o ARMTRS atua no sentido de regular a tensão na barra de carga, localizada a 8,5km do ponto de suprimento até um carregamento de 144% da corrente de carga nominal, independentemente do carregamento em que o alimentador se encontra. No entanto, para um carregamento de 111% (4º ano) será necessário acrescentar mais uma célula ao banco de capacitor série visando que este suporte as sobretensões oriunda de um defeito, e que nenhum consumidor a jusante do ARMTRS não ultrapasse a faixa de variação da tensão estabelecida pela Resolução da ANEEL.

**Tabela 2.6** – Regulação de Tensão promovida pelo ARMTRS para diferentes situações de cargas - SLM -01C3.

<i>Ano</i>	<i>Carregamento (%) Nominal</i>	<i>Corrente (<math>A_{RMS}</math>)</i>	<i>Tensão após o ARMTRS (pu)</i>	<i>Tensão na barra fim - 8,5 km (pu)</i>	<i>Tensão transitória no BCS (kV)</i>
<b>1</b>	100	115,0	1,05	1,04	11,4
<b>2</b>	105,4	121,2	1,05	1,04	11,5
<b>3</b>	111,0	127,7	1,05	1,04	11,6
<b>4*</b>	111,0	127,7	1,06	1,05	11,7
<b>4**</b>	117,0	134,5	1,01	1,00	11,2
<b>5</b>	123,2	141,7	1,01	1,00	11,2
<b>6</b>	129,8	149,3	1,01	1,00	11,2
<b>7</b>	136,8	157,3	1,01	1,00	11,2
<b>8</b>	144,1	165,7	1,01	1,00	11,2

\* Sem alteração no BCS. \*\* Com alteração no BCS.

Observou-se que no ano 4, quando a carga cresce em 111% a tensão na barra após o ARMTRS ultrapassa os limites estabelecidos pela Resolução da ANEEL, apesar de a tensão no BCS não ultrapassar o limite suportável no transitório se faz necessário o acréscimo de uma célula capacitiva ao BCS sem mudar a reatância do RLS. Ou seja, esse artifício de acrescentar uma célula ao BCS sem a necessidade de mudar o tap do reator linear faz com que a reatância líquida capacitiva desse sistema seja reduzida de  $8\Omega$  para  $5\Omega$  sem comprometer a regulação da tensão na barra de carga mais extrema do alimentador e o desempenho do RNS.

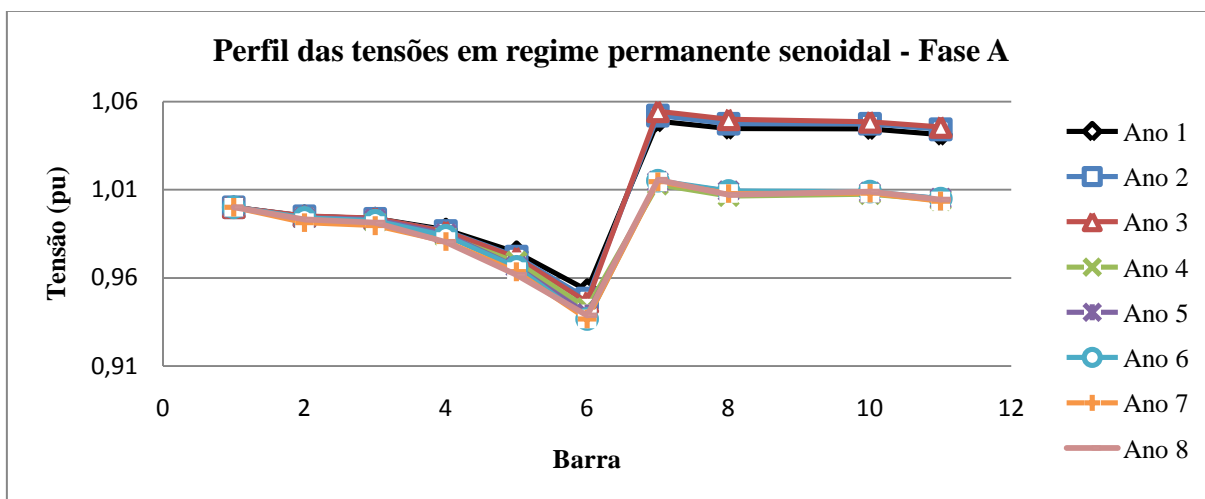
Já para o alimentador de ITA-03, o ARMTRS também atua no sentido de regular a tensão na barra de carga, localizada a 14,5 km do ponto de suprimento como mostra a Tabela 2.7, porém, diferentemente do alimentador de SLM-01C3 não há a necessidade de acrescentar mais uma célula ao banco de capacitor série já que este não ultrapassou as sobretensões oriundas de um defeito e nem ultrapassou os limites permitidos pela Resolução ANEEL. Portanto não será necessário deslocar o ARMTRS para um ponto distante do qual ele foi instalado ao longo de 10 anos e não há a necessidade de se mudar a capacitância líquida do sistema mesmo com o crescimento da carga.

**Tabela 2.7** – Regulação de Tensão promovida pelo ARMTRS para diferentes situações de cargas - ITA-01C3.

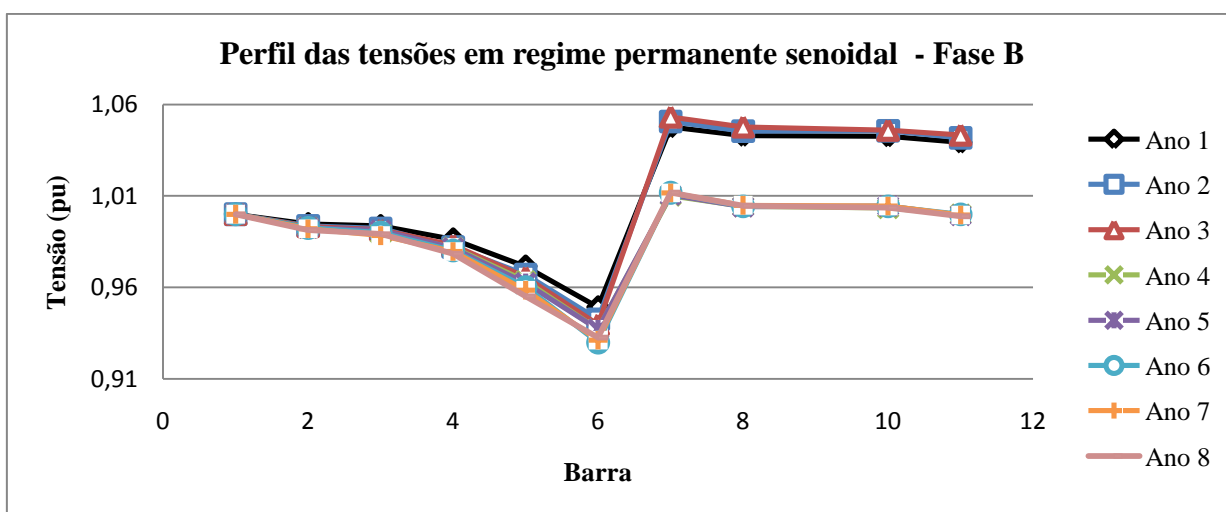
<i>Ano</i>	<i>Carregamento (%) Nominal</i>	<i>Corrente (<math>A_{RMS}</math>)</i>	<i>Tensão após o ARMTRS (pu)</i>	<i>Tensão na barra fim - 8,558 km (pu)</i>	<i>Tensão transitória no BCS (kV)</i>
<b>1</b>	100	69	1,03	1,00	14,4
<b>2</b>	103,4	71,3	1,03	1,00	14,5
<b>3</b>	106,9	73,8	1,03	1,00	14,5
<b>4</b>	110,6	76,3	1,03	1,00	14,6
<b>5</b>	114,3	78,9	1,03	1,00	14,6
<b>6</b>	118,2	81,6	1,03	1,00	14,6
<b>7</b>	122,2	84,3	1,03	1,00	14,6
<b>8</b>	126,4	87,2	1,03	1,00	14,7
<b>9</b>	130,7	90,2	1,03	1,00	14,7
<b>10</b>	135,1	93,2	1,03	1,00	14,8

As formas de onda das tensões nos pontos P0 e nas barras de cargas ao longo dos anos para ambos alimentadores podem ser observados nas figuras do Apêndice 6.7 e 6.8.

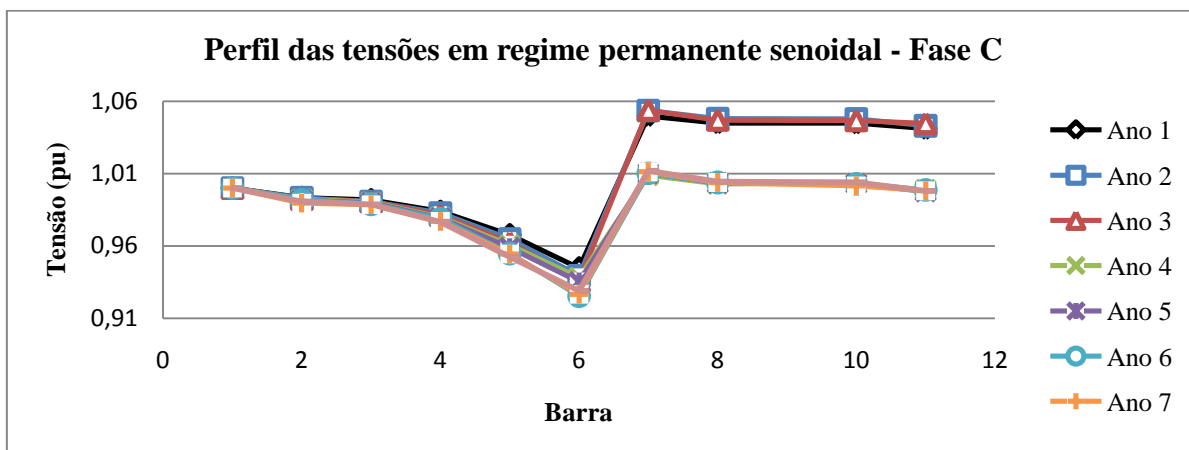
As Figuras 2.19, 2.20 e 2.21 apresentam o perfil das tensões em regime permanente senoidal para cada uma das situações de carregamento analisadas na Tabela 2.6 para o alimentador de SLM-01C3. Uma vez que o RNS, nessas condições, está operando fora de sua região de saturação, toda a corrente de carga irá circular pelo BCS. Isto se deve ao fato de a tensão nos terminais do RNS ser insuficiente para levá-lo à saturação, de modo que ele estará funcionando como uma chave aberta.



**Figura 2.19** – Perfil das tensões em regime permanente para diversos tipos de carregamento - SLM-01C3 – Fase A.

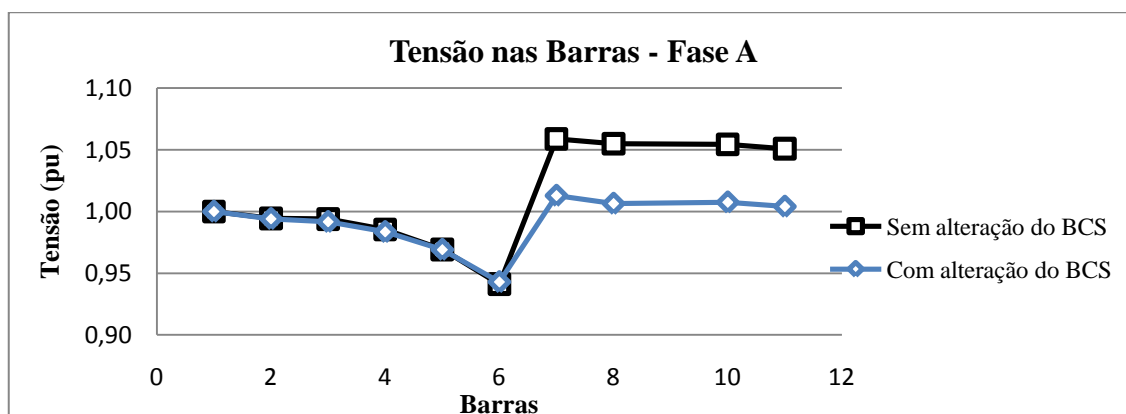


**Figura 2.20** – Perfil das tensões em regime permanente para diversos tipos de carregamento - SLM-01C – Fase B.

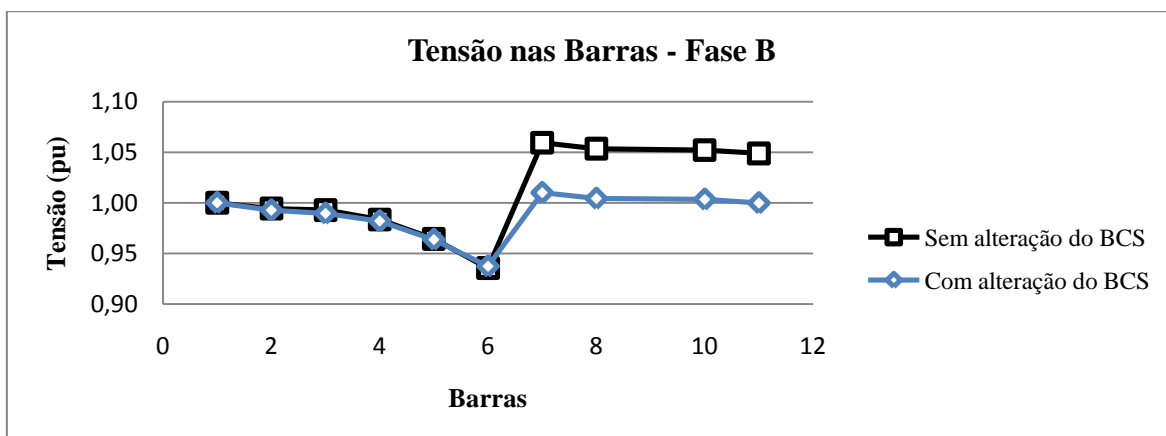


**Figura 2.21** – Perfil das tensões em regime permanente para diversos tipos de carregamento - SLM-01C3 – Fase C.

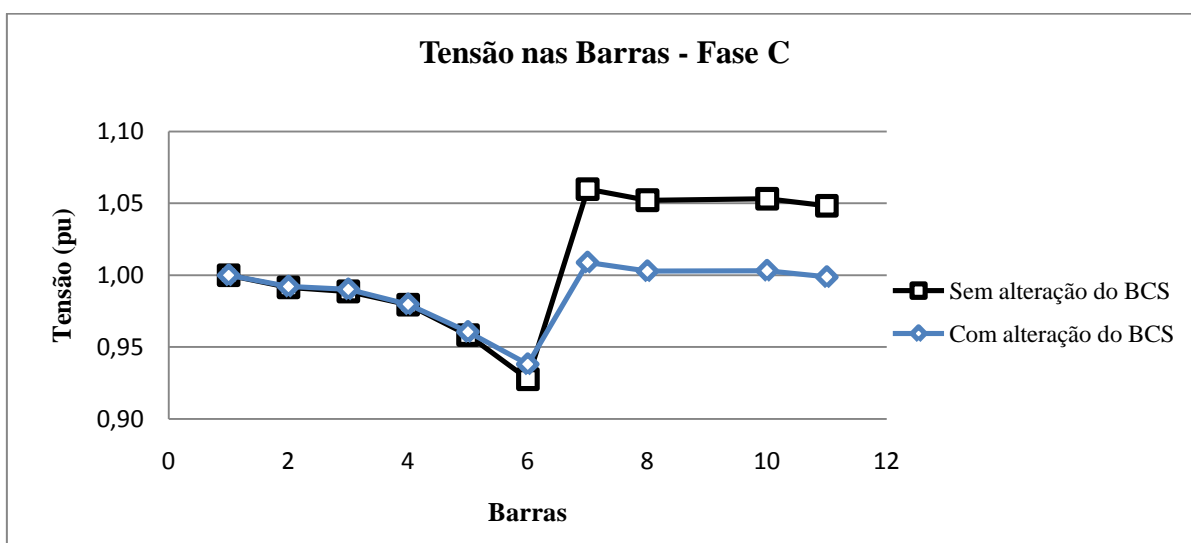
As Figuras 2.22, 2.23 e 2.24 apresentam o perfil das tensões em regime permanente senoidal para o ano 4, alimentador SLM-01C3, com e sem a alteração do BCS.



**Figura 2.22** – Perfil das tensões em regime permanente para o ano 4, com e sem alteração do BCS - SLM-01C3 – Fase A.

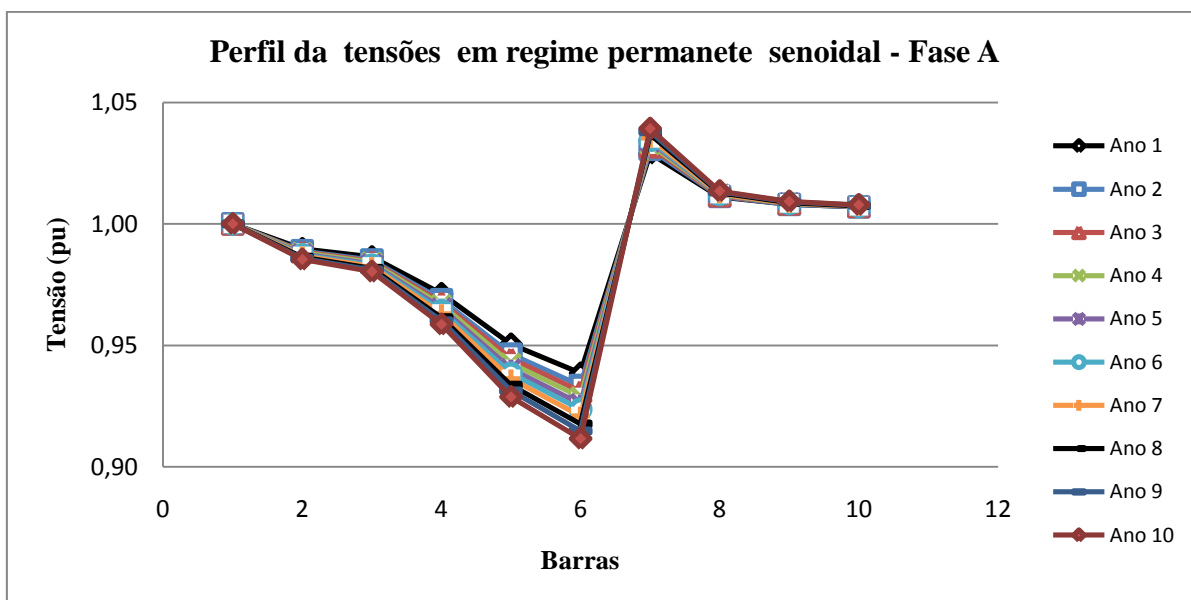


**Figura 2.23** – Perfil das tensões em regime permanente para o ano 4, com e sem alteração do BCS - SLM-01C3 – Fase B.

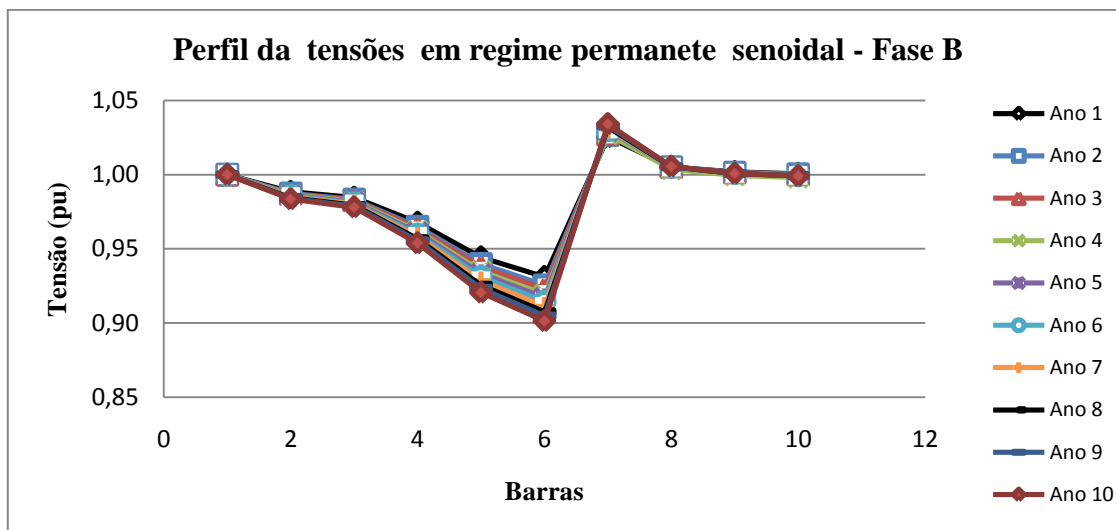


**Figura 2.24** – Perfil das tensões em regime permanente para o ano 4, com e sem alteração do BCS - SLM-01C3 – Fase C.

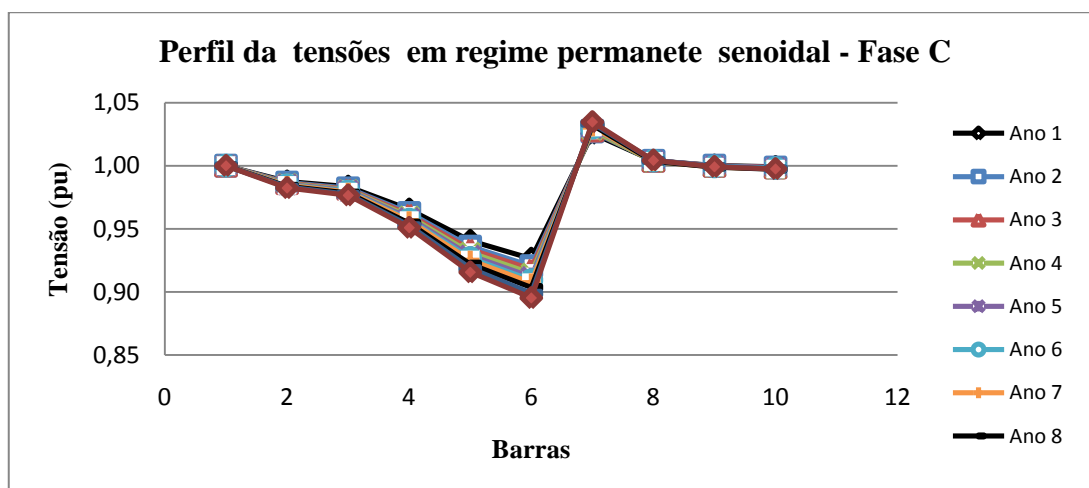
As Figuras 2.25, 2.26 e 2.27 apresentam o perfil das tensões em regime permanente senoidal para o alimentador de ITA-03 para cada uma das situações de carregamento analisadas na Tabela 2.7.



**Figura 2.25** – Perfil das tensões em regime permanente para diversos tipos de carregamento - Fase A – ITA-03.



**Figura 2.26** – Perfil das tensões em regime permanente para diversos tipos de carregamento - Fase B – ITA-03.



**Figura 2.27** – Perfil das tensões em regime permanente para diversos tipos de carregamento - Fase C – ITA-03.

### 2.3.2 - Análise em regime transitório

Para a análise do ARMTRS em regime transitório, foi verificado o comportamento dos sistemas elétricos apresentados no item 2.1 quando da ocorrência de um curto-circuito na barra de carga, a 8,5km para o alimentador de SLM-01C3 e a 14,5km para o alimentador de ITA-03, conforme mostra as Figuras 2.28 e 2.29. As análises em regime transitório foram realizadas considerando-se a ocorrência de curtos-circuitos monofásicos na fase A, bifásicos com terra entre as fases A e B e trifásicos. Nessas situações são apresentadas as correntes nas fases em curto-circuito e nas fases sãs, de modo a avaliar a



operação do ARMTRS frente aos distúrbios elétricos na rede de distribuição. Os defeitos foram simulados com duração de 60 ciclos, tempo típico para defeitos auto extinguidos.

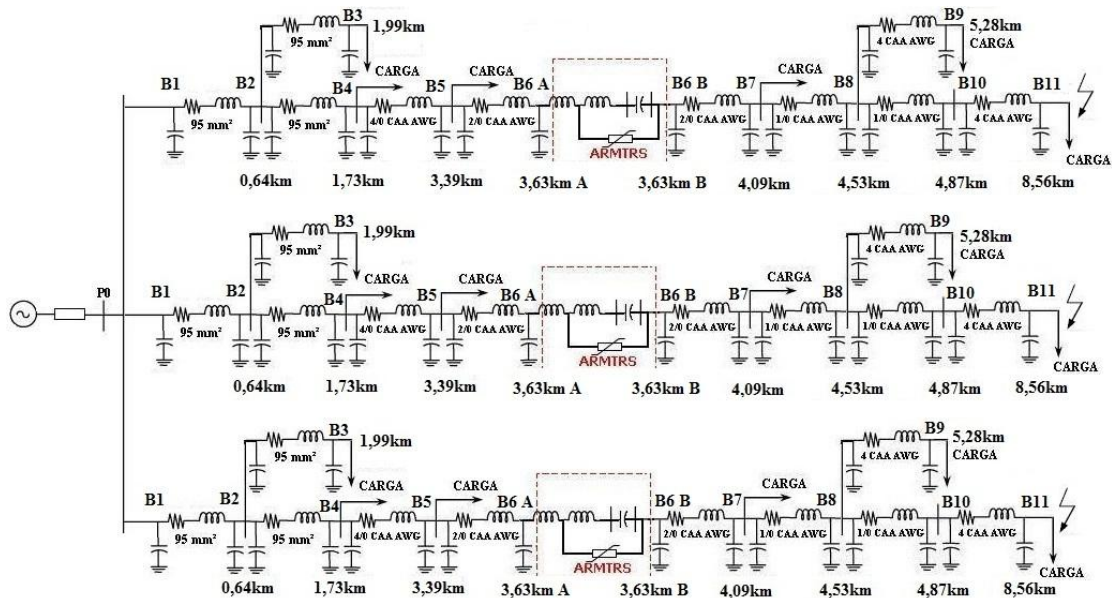


Figura 2.28 – Curto circuito na barra de carga, a 8,56km da SE – SLM-01C3.

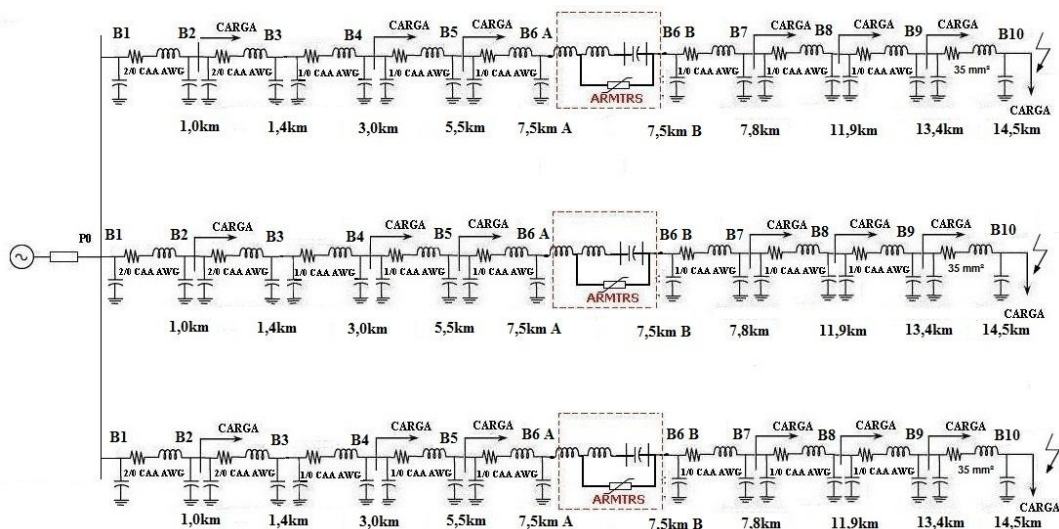
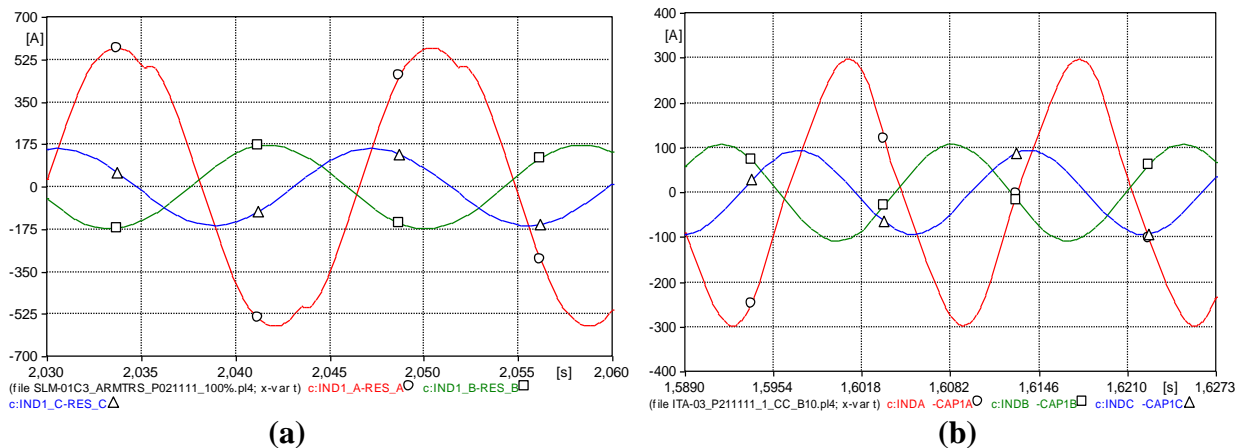


Figura 2.29 – Curto circuito na barra de carga, a 14,5km da SE – ITA-03.

### 2.3.2.1 – Curto-circuito monofásico

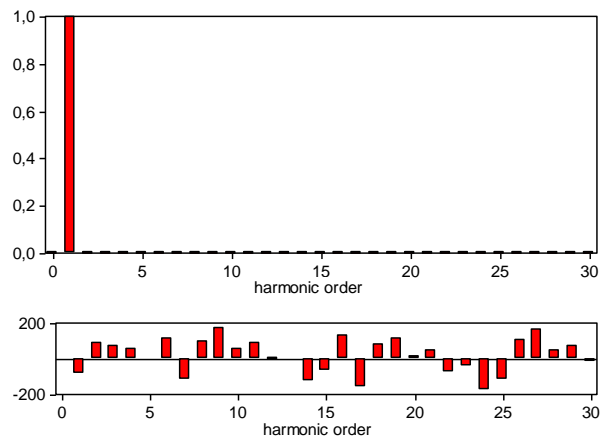
A Figura 2.30 apresenta as formas de onda das correntes de carga das fases durante um curto-circuito monofásico na fase A, para os alimentadores de SLM-01C3 e ITA-03, respectivamente.



**Figura 2.30** – Corrente de carga durante um curto circuito na fase A – Fase A ( $\circ$ ), fase B ( $\square$ ) e fase C ( $\Delta$ ) – (a) SLM-01C3 e (b) ITA-03.

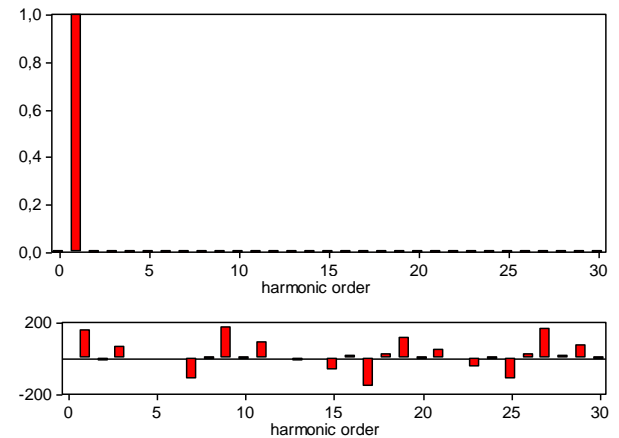
A Figura 2.31 apresenta os histogramas em pu da corrente fundamental para as fases sãs para o alimentador de SLM-01C3. Os valores das correntes fundamentais e a distorção harmônica total (THD) são mostrados na Tabela 2.8.

MC's PlotXY - Fourier chart(s). Copying date: 10/12/2011  
File SLM-01C3\_ARMTRS\_P021111\_100%.pl4 Variable c:IND1\_B-RE  
Initial Time: 2,183 Final Time: 2,2



(a)

MC's PlotXY - Fourier chart(s). Copying date: 10/12/2011  
File SLM-01C3\_ARMTRS\_P021111\_100%.pl4 Variable c:IND1\_C-RE  
Initial Time: 2,183 Final Time: 2,2



(b)

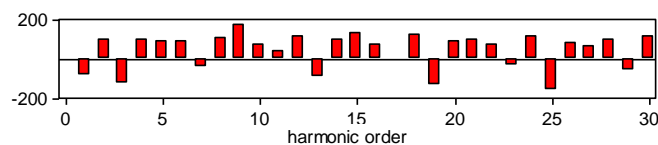
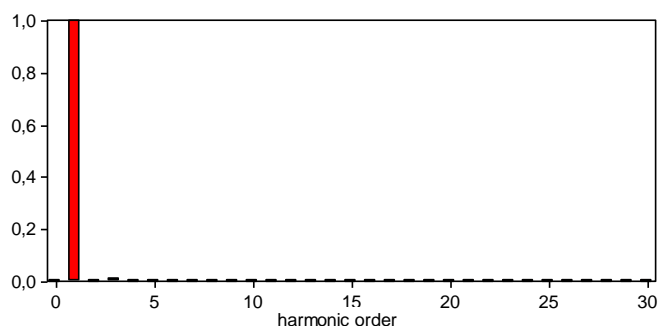
**Figura 2.31** – Histograma em pu da corrente fundamental devido a um curto-circuito monofásico na fase A, a 8,5km do ponto de suprimento, com o ARMTRS; (a) Fase B e (b) Fase C – SLM-01C3.

**Tabela 2.8** – Corrente Fundamental e harmônico nas fases sãs devido a um curto-circuito monofásico na fase A, a 8,5km do ponto de suprimento, com ARMTRS – SLM-01C3.

Fase B			Fase C		
Ordem harmônica	Amplitude (A <sub>PU</sub> )	Fase (Graus)	Ordem harmônica	Amplitude (A <sub>PU</sub> )	Fase (Graus)
1	1	-91,151	1	1	150,07
2	3,40E-05	87,21	2	6,04E-05	-14,72
3	4,88E-03	66,747	3	5,53E-03	66,015
4	4,50E-06	56,025	4	2,55E-05	-6,1479
5	2,69E-03	-6,3342	5	3,07E-03	-7,0999
THD=0,65%			THD=0,74%		

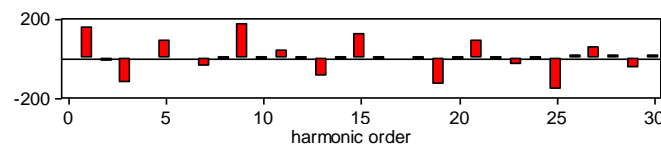
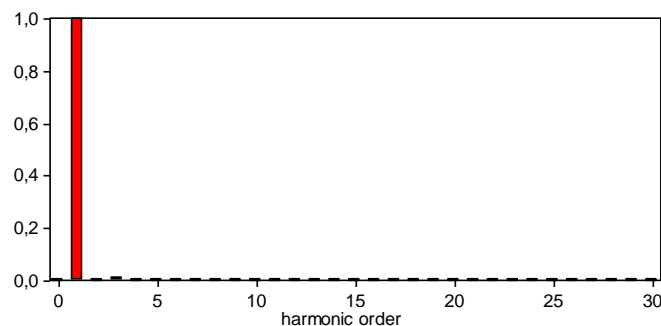
A Figura 2.32 apresenta os histogramas em pu da corrente fundamental para as fases sãs para o alimentador de ITA-03. Os valores das correntes fundamentais e a distorção harmônica total (THD) são mostrados na Tabela 2.9.

MC's PlotXY - Fourier chart(s). Copying date: 07/12/2011  
 File ITA-03\_P211111\_1\_CC\_B10.pl4 Variable c:INDB -CAP1B [[pu c  
 Initial Time: 2,183 Final Time: 2,2



(a)

MC's PlotXY - Fourier chart(s). Copying date: 07/12/2011  
 File ITA-03\_P211111\_1\_CC\_B10.pl4 Variable c:INDC -CAP1C [[pu c  
 Initial Time: 2,183 Final Time: 2,2



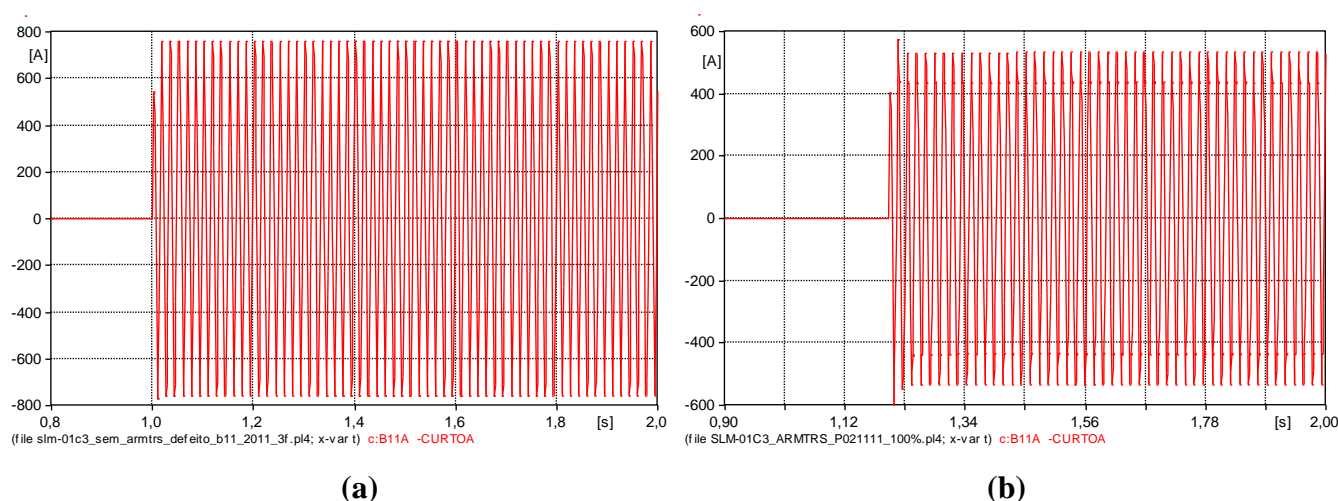
(b)

**Figura 2.32** – Histograma em pu da corrente fundamental devido a um curto-circuito monofásico na fase A, a 14,5km do ponto de suprimento, com o ARMTRS; (a) Fase B e (b) Fase C – ITA-03.

**Tabela 2.9 - Corrente Fundamental e harmônico nas fases sãs devido a um curto-circuito monofásico na fase A, a 14,5km do ponto de suprimento, com ARMTRS – ITA-03.**

<i>Fase B</i>			<i>Fase C</i>		
<b>Ordem harmônica</b>	<b>Amplitude (A<sub>PU</sub>)</b>	<b>Fase (Graus)</b>	<b>Ordem harmônica</b>	<b>Amplitude (A<sub>PU</sub>)</b>	<b>Fase (Graus)</b>
<b>1</b>	1	-89,457	<b>1</b>	1	152,01
<b>2</b>	3,10E-05	93,663	<b>2</b>	5,91E-05	-23,634
<b>3</b>	9,15E-03	-129,9	<b>3</b>	1,10E-02	-130,17
<b>4</b>	1,03E-05	95,953	<b>4</b>	2,42E-05	-2,0773
<b>5</b>	2,18E-03	85,532	<b>5</b>	2,61E-05	84,312
<b>THD=0,94%</b>			<b>THD=1,13%</b>		

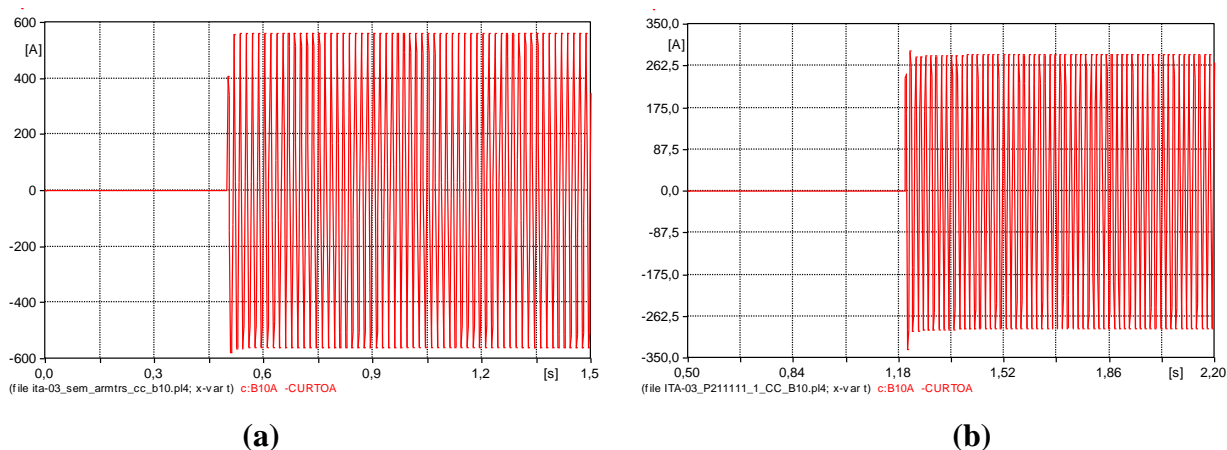
A Figura 2.33 mostra as formas de ondas das correntes de curto circuito durante um defeito aplicado na barra de carga a 8,5 km do ponto de suprimento sem e com ARMTRS, respectivamente, para o alimentador de SLM-01C3.



**Figura 2.33 – Corrente para um curto- circuito aplicado na barra de carga a 8,5 km do ponto de suprimento (a) sem a presença do ARMTRS e (b) com a presença do ARMTRS – SLM-01C3.**

Para o alimentador de SLM-01C3 a corrente de curto sem a presença do ARMTRS é na ordem de 537 A<sub>RMS</sub> e com a presença do ARMTRS a corrente de curto foi reduzida para 384 A<sub>RMS</sub>, ou seja, devido à presença do reator linear série, observa-se uma redução na corrente de curto-circuito na fase A de cerca de 28,5 % daquela verificada sem a presença do ARMTRS.

A Figura 2.34 mostra as formas de ondas das correntes de curto circuito durante um defeito aplicado na barra de carga a 14,5 km do ponto de suprimento sem e com ARMTRS, respectivamente, para o alimentador de ITA-03.

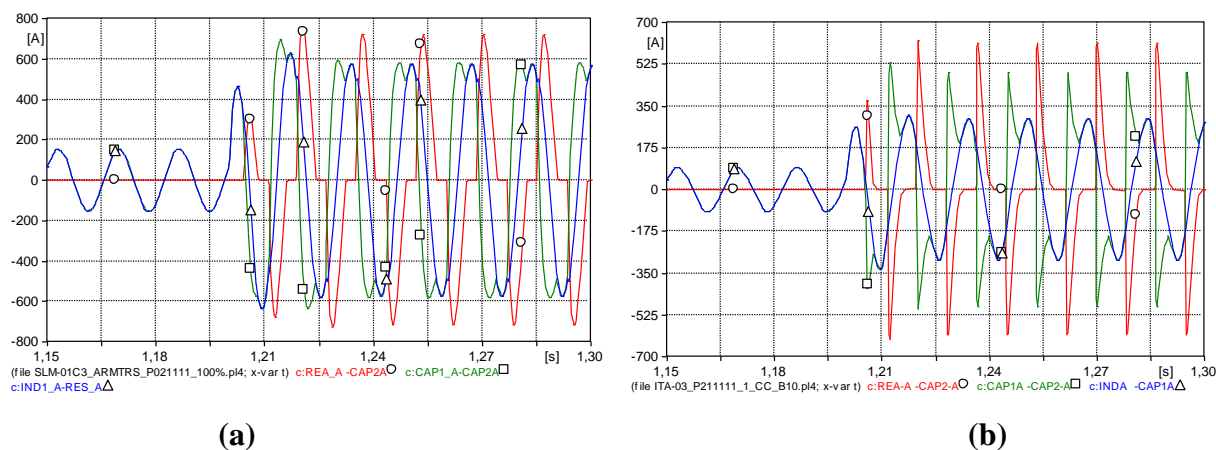


**Figura 2.34** – Corrente para um curto-circuito aplicado na barra de carga a 14,5 km do ponto de suprimento (a) sem a presença do ARMTRS e (b) com a presença do ARMTRS – ITA-03.

Para o alimentador de ITA-03 a corrente de curto sem a presença do ARMTRS é na ordem de  $397A_{RMS}$  e com a presença do ARMTRS a corrente de curto foi reduzida para  $195A_{RMS}$ , ou seja, devido à presença do reator linear série, observa-se uma redução na corrente de curto-circuito na fase A de cerca de 51% daquela verificada sem a presença do ARMTRS.

O reator saturado é dimensionado de modo que a elevada tensão que surge em seus terminais durante a ocorrência de um curto-circuito seja suficiente para levá-lo à condição de saturação. Nessa condição, a corrente fundamental é desviada do banco de capacitores série, passando a circular pelo reator naturalmente saturado.

A Figura 2.35 apresenta as formas de onda das correntes no BCS, no RNS e a corrente total do sistema, no instante que precedem o curto-circuito e durante sua ocorrência, para o alimentador de SLM-01C3 e ITA-03, respectivamente.



**Figura 2.35** – Forma de onda das correntes: (○) Corrente no RNS, (□) Corrente no BCS e (Δ) Corrente Total – (a) SLM-01C3 e (b) ITA-03.

De acordo com [3] pode ser percebido na Figura 2.35 o comportamento das correntes no ARMTRS, onde a corrente no BCS acompanha a corrente total do sistema enquanto a corrente no RNS é nula em regime permanente, passando a se opor a corrente do RNS quando esta produz o pico característico de elementos magneticamente saturados. Este pico de corrente no RNS se dá quando a tensão em seus terminais ultrapassa um valor crítico, chamado tensão de início de saturação, conforme será explicado no capítulo 3. Neste momento, a corrente no BCS que era igual à corrente total, passa a se opor a corrente no RNS e a corrente resultante desta soma é a corrente total. Pode ser observado também que a corrente resultante (total) no intervalo de tempo que o RNS está saturado é basicamente indutiva, já que a corrente no RNS é maior que a corrente no capacitor. Resumindo, em qualquer instante,

$$I_T = I_{RNS} + I_{BCS} \quad (2.1)$$

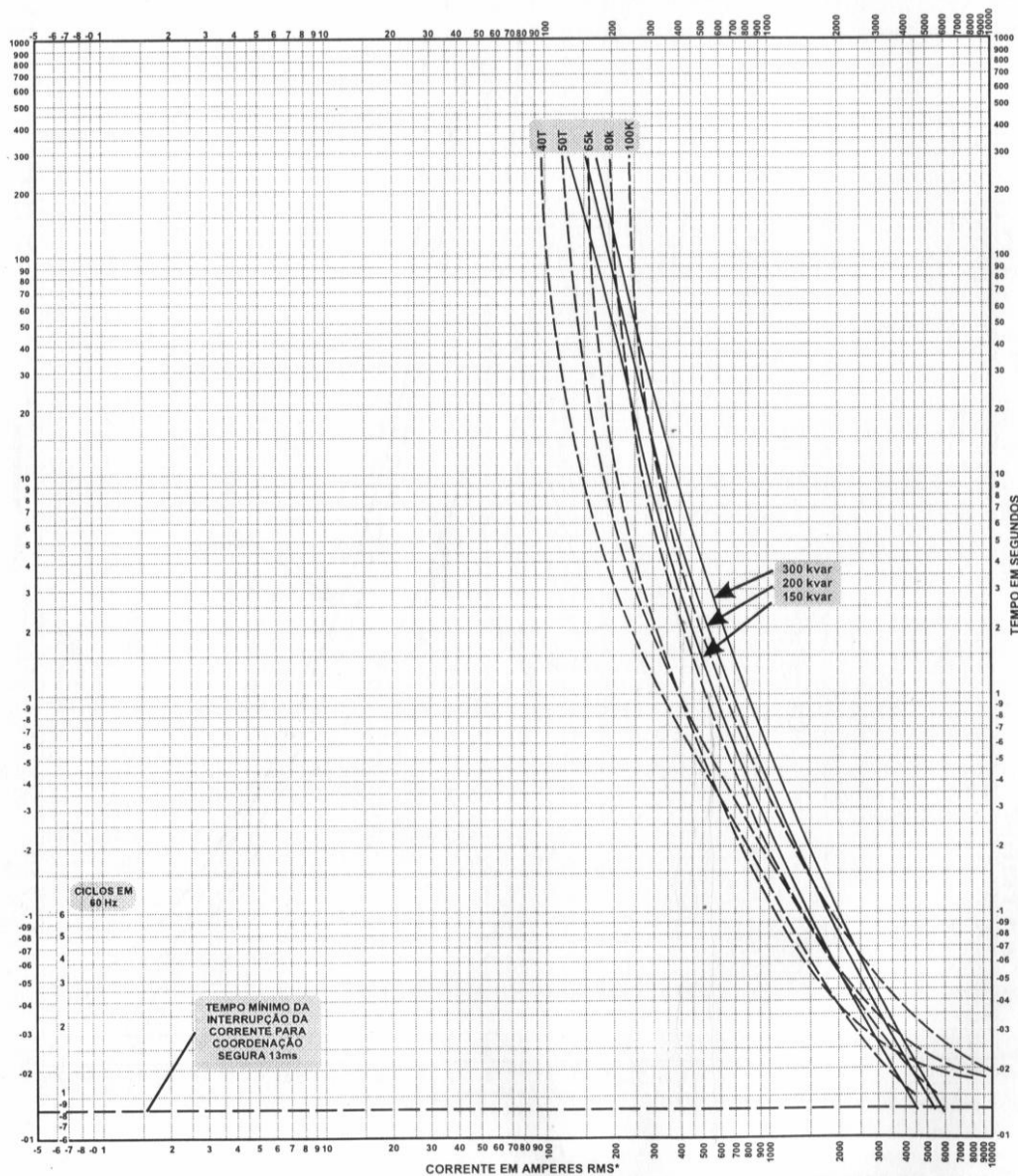
e o restante de corrente que não vai para carga, fica oscilando entre o BCS e o RNS, pois este paralelo torna-se um circuito oscilatório.

Durante a ocorrência de um curto-circuito num sistema de potência, os equipamentos devem suportar, sem prejuízo no seu desempenho, todas as solicitações de corrente e de tensão que possam surgir até o instante em que os disjuntores atuem no sentido de isolar o trecho defeituoso no sistema. Por isso é de extrema importância analisar cuidadosamente as sobrecorrentes e sobretensões as quais estarão submetidas o BCS durante a ocorrência de um defeito.

Os valores de corrente que cada célula de capacitor pode suportar em regime transitório é mostrado na Figura 2.36 onde mostra a curva de suportabilidade garantidos pelo fabricante de capacitores (Inducon). Como norma, recomenda-se, sempre que possível, o uso de fusível individual. Se for usado fusível de grupo, deve-se evitar mais de 4 (quatro) capacitores em paralelo por grupo.

De qualquer maneira, quer seja usado fusível individual ou de grupo, será sempre desejável que, na ocasião de um eventual defeito, o tempo total de interrupção do fusível – para a corrente de defeito – seja inferior ao tempo de ruptura da caixa do capacitor defeituoso. Para tal verificação, lança-se mão das curvas máximas (tempo máximo X corrente – curva de suportabilidade) dos elos fusíveis e também das curvas de

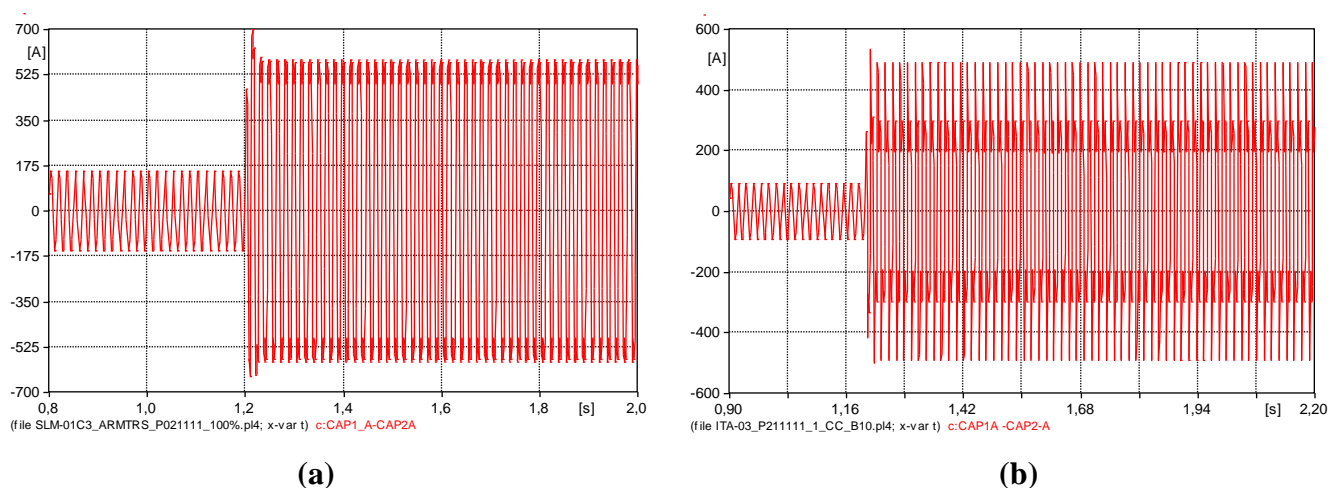
probabilidade de ruptura de caixa do capacitor. Na zona de altas correntes (como é o caso de pequenos bancos em  $\Delta$  ou em Y aterrado), para operação segura, o tipo do fusível a ser usado não deve ser mais robusto que o 25T para as unidades de 25 ou 50 kvar, nem mais robusto que 30T para unidades de 100 kvar, nem mais robusto que 80K para unidades de 200 kvar ou mais [4].



**Figura 2.36** – Curva de suportabilidade das células capacitivas.

No projeto do ARMTRS para o alimentador de SLM-01C3 foram usadas quatro (4) células de capacitores de 300 kvar em paralelo com tensão nominal de 4,16 kV. Já para o projeto do alimentador de ITA-03 foram usadas seis (6) células de capacitores de 400 kVAr em paralelo com tensão nominal de 8,66 kV, conforme descrito no Anexo 7.1. A

Figura 2.37 mostra a forma de onda das correntes submetida ao BCS antes e durante um defeito, para o alimentador de SLM-01C3 e ITA-03, respectivamente.



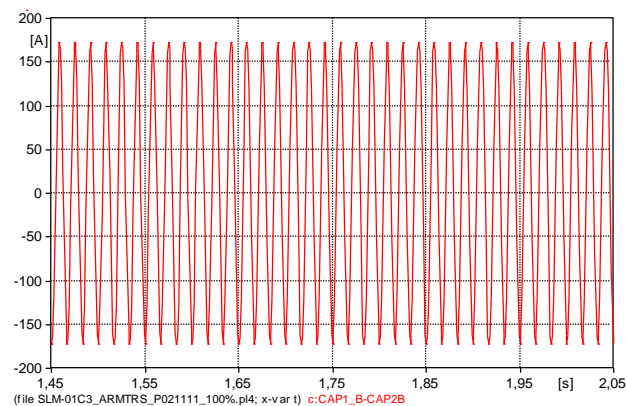
**Figura 2.37** – Forma de onda da corrente no BCS antes e durante um curto na fase A – (a) SLM-01C3 e (b) ITA-03

A corrente eficaz que circula pelo BCS em regime transitório para o alimentador de SLM-01C3 é de 493A, portanto, a corrente que passa por cada célula em regime transitório é aproximadamente igual a 123,2A, já para o alimentador de ITA-03 a corrente eficaz que circula pelo BCS em regime transitório é de 376,4A, portanto, a corrente que passa por cada célula em regime transitório é aproximadamente igual a 62,7A. Segundo a curva de suportabilidade para 200A, a célula suporta 100 segundos o que corresponde a 6000 ciclos, ou seja, tempo superior a duração típica do curto que é de 60 ciclos, para defeitos auto extinguidos ou para operação da proteção.

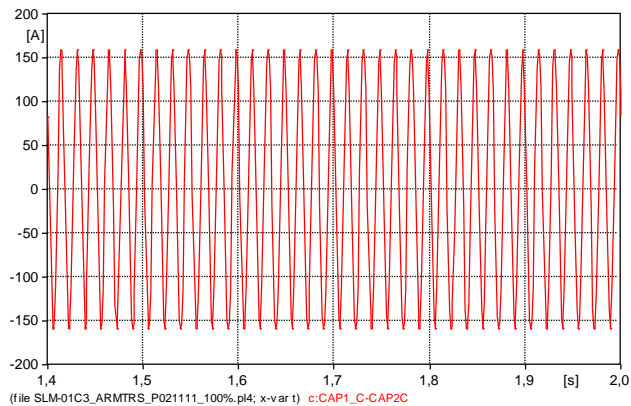
Em regime permanente a corrente que circula no BCS do alimentador de SLM-01C3 é de  $115A_{RMS}$ , portanto, a corrente que passa em cada célula capacitiva em regime permanente é aproximadamente igual a  $28,75A_{RMS}$  não ultrapassando a corrente nominal de funcionamento que é de  $72,1A_{RMS}$ , já para o alimentador de ITA-03 a corrente que circula no BCS é de  $69 A_{RMS}$ , portanto, a corrente que passa em cada célula capacitiva em regime permanente é aproximadamente igual a  $11,5A_{RMS}$  também não ultrapassando a corrente nominal de funcionamento que é de  $46,2A_{RMS}$ .

Na ocorrência de um curto-circuito monofásico na fase A, não foram observadas sobrecorrentes no BCS nas fases B e C, para ambos alimentadores, ficando a corrente nessas fases em níveis adequados, conforme mostrado na Figura 2.38.

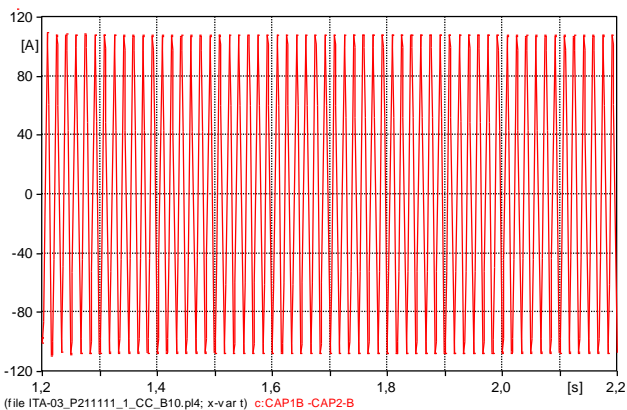




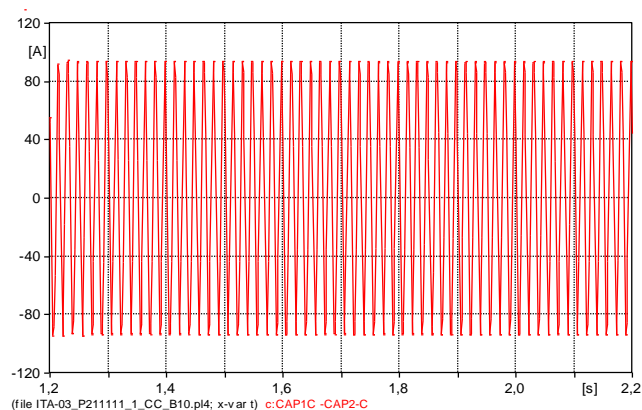
(a)



(b)



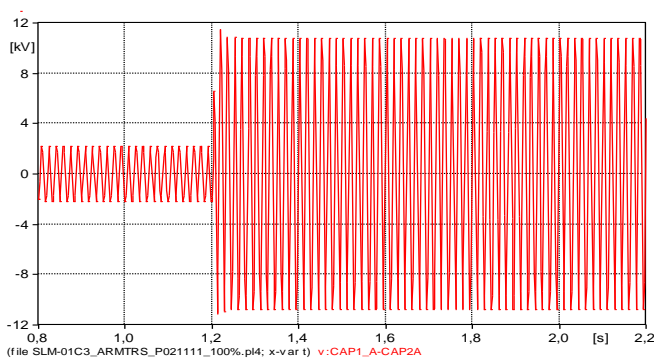
(c)



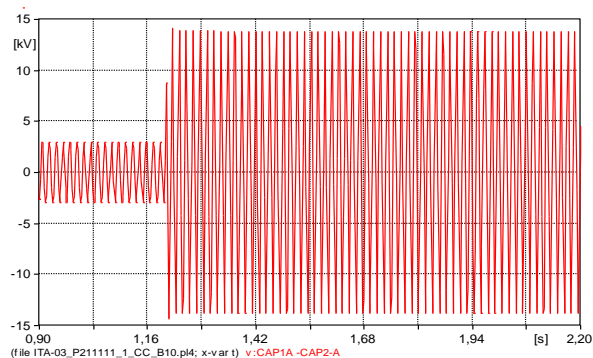
(d)

**Figura 2.38** – Forma de onda da corrente no BCS durante um curto na fase A – (a) Fase B e (b) Fase C - SLM-01C3; (c) Fase B e (d) Fase C – ITA-03.

A Figura 2.39 mostra a forma de onda da tensão aplicada nos terminais do BCS antes e durante um defeito localizado na barra de carga a 8,5km e 14,5km da fonte supridora, para ambos os alimentadores.



(a)



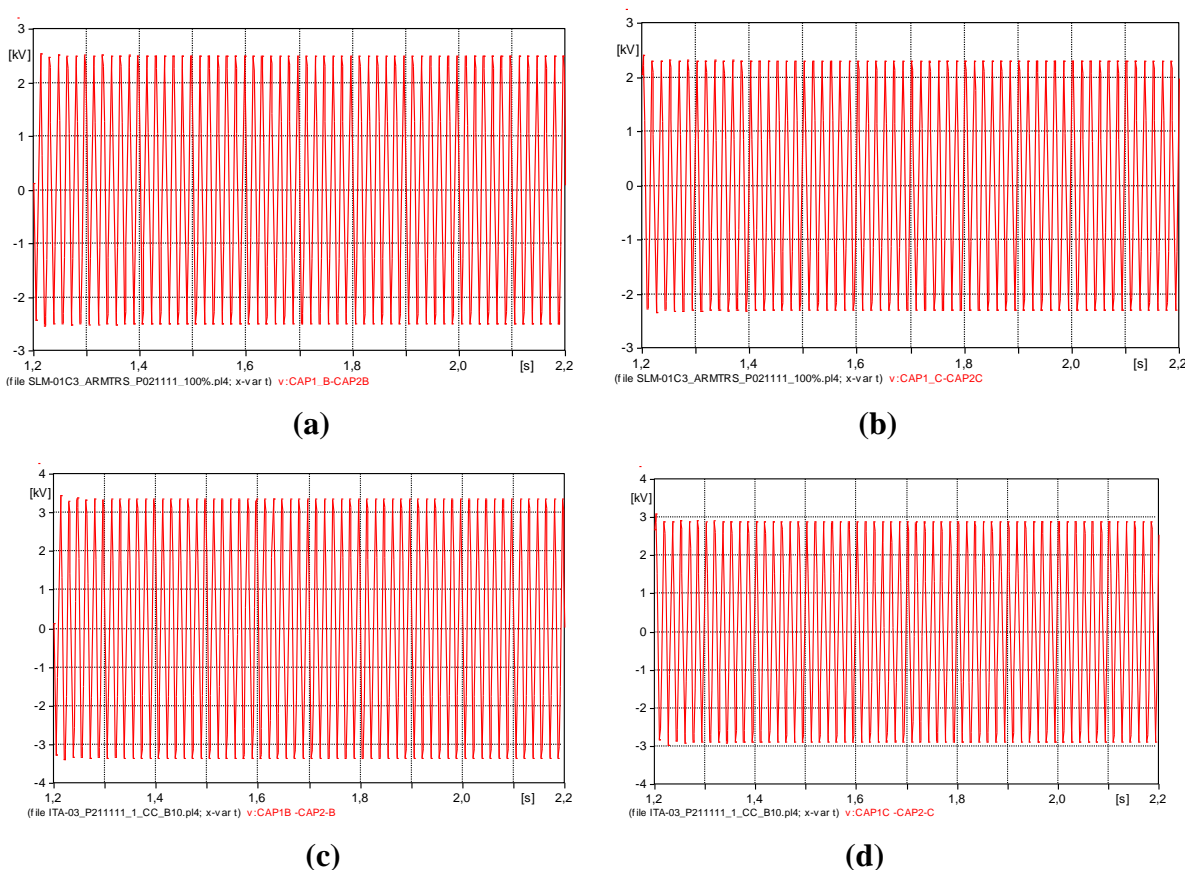
(b)

**Figura 2.39** – Forma de onda da tensão nos terminais do BCS antes e durante um curto na fase A – (a) SLM-01C3 e (b) ITA-03.

Conforme mostraram os resultados de simulações o pico de tensão aplicado no BCS em regime transitório é aproximadamente, 11,4 e 14,1kV, para o alimentador de SLM-01C3 e ITA-03, respectivamente. E de acordo com [5] os capacitores são capazes de suportarem distúrbios transitórios de  $2\sqrt{2}$  vezes a tensão nominal sem danificar a célula. Para o banco de 300kvar a tensão nominal é de 4,16kV isso implica que a célula é capaz de suportar sobretensões até 11,8kV e a para o banco de 400kvar a tensão nominal é de 8,66kV, suportando sobretensões até 24,4kV.

Já em regime permanente a tensão nos terminais do BCS do alimentador de SLM-01C3 é de  $1,6kV_{RMS}$  não ultrapassando a tensão nominal de funcionamento que é de  $4,16kV_{RMS}$  e para o alimentador de ITA-03 a tensão nos terminais do banco em regime permanente é de 2,1kV também não ultrapassando a tensão nominal de funcionamento que é de  $8,66kV_{RMS}$ .

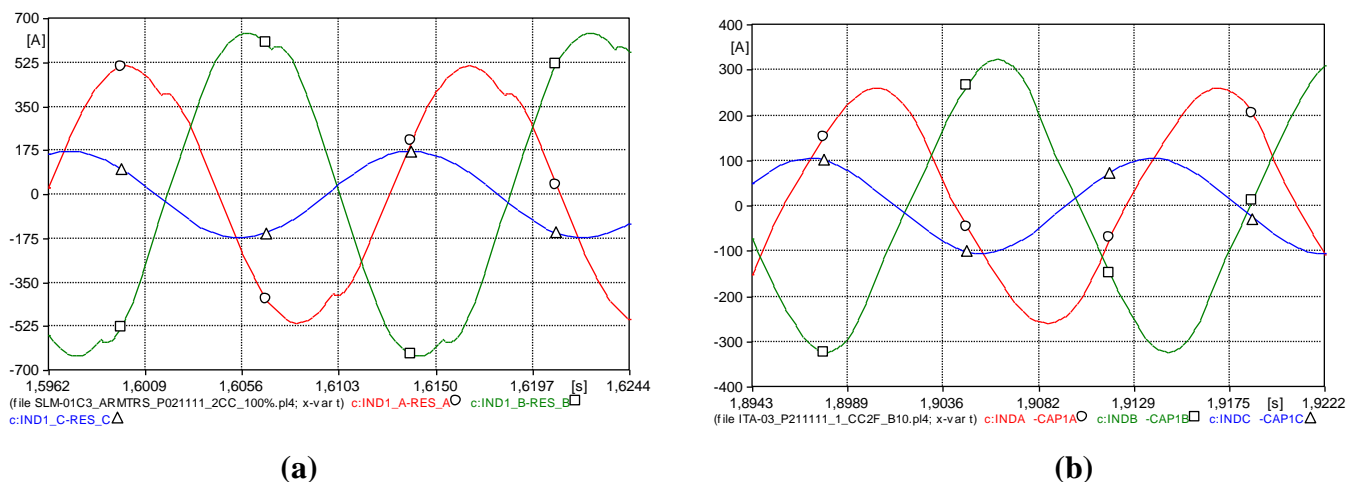
Na ocorrência de um curto-circuito monofásico na fase A, não foram observadas sobretensões nos BCS nas fases sãs B e C, de ambos alimentadores, ficando a tensão nessas fases em níveis adequados, conforme mostrado na Figura 2.40.



**Figura 2.40** – Forma de onda da tensão no BCS durante um curto na fase A – (a) Fase B e (b) Fase C - SLM-01C3; (c) Fase B e (d) Fase C – ITA-03.

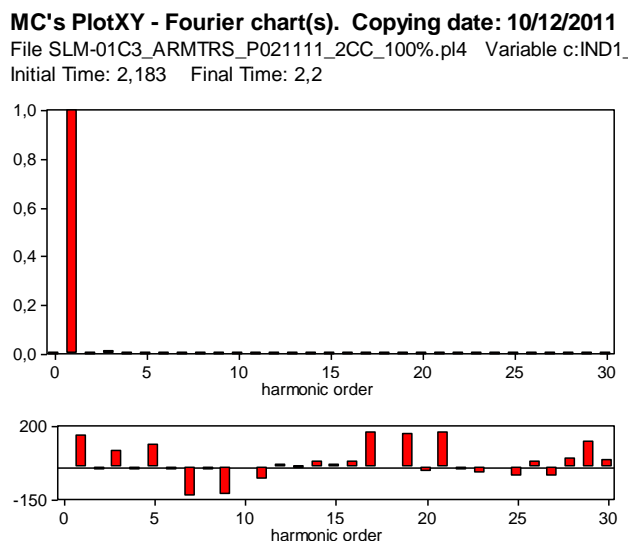
### 2.3.2.2 – Curto-circuito bifásico com terra

A Figura 2.41 apresenta a forma de onda das correntes de carga das fases durante um curto-circuito bifásico com terra entre as fases A e B, para os alimentadores de SLM-01C3 e ITA-03, respectivamente.



**Figura 2.41** – Corrente de carga durante um curto circuito bifásico com terra entre as fases A e B – Fase A (○), fase B (□) e fase C (Δ) – (a) SLM-01C3 e (b) ITA-03.

A Figura 2.42 apresenta o histograma em pu da corrente fundamental para a fase C para o alimentador de SLM-01C3. O valor da corrente fundamental e a distorção harmônica total (THD) são mostrados na Tabela 2.10.

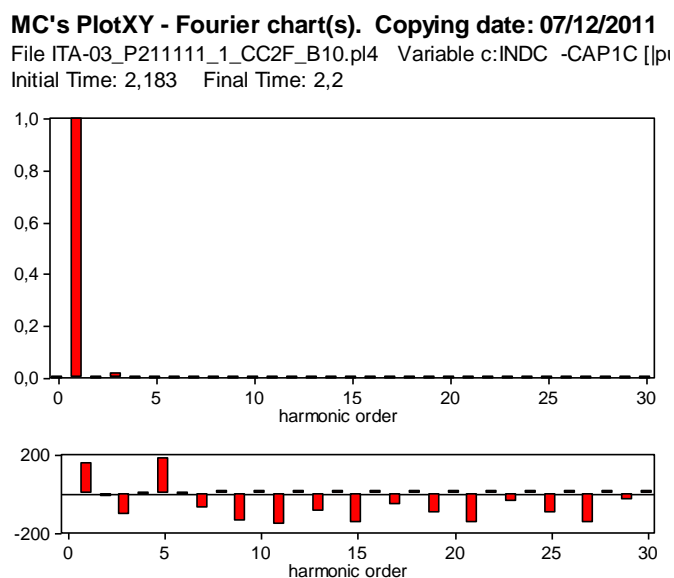


**Figura 2.42** – Histograma em pu da corrente fundamental para a fase C, devido a um curto-circuito bifásico entre as fases A e B, a 8,5km do ponto de suprimento, com o ARMTRS – SLM-01C3.

**Tabela 2.10** - Corrente Fundamental e harmônico na fase sã (C) devido a um curto-circuito bifásico com terra entre as fases A e B, a 8,5km do ponto de suprimento, com ARMTRS – SLM-01C3.

<i>Ordem harmônico</i>	<i>Amplitude (<math>A_{RMS}</math>)</i>	<i>Fase (Graus)</i>
<b>1</b>	1	150,95
<b>2</b>	6,05E-05	-13,822
<b>3</b>	8,47E-03	82,105
<b>4</b>	2,36E-05	-7,5125
<b>5</b>	1,70E-03	105,48
<b>THD=0,99%</b>		

A Figura 2.43 apresenta o histograma em pu da corrente fundamental para a fase sã para o alimentador de ITA-03. O valor da corrente fundamental e a distorção harmônica total (THD) são mostrados na Tabela 2.11.

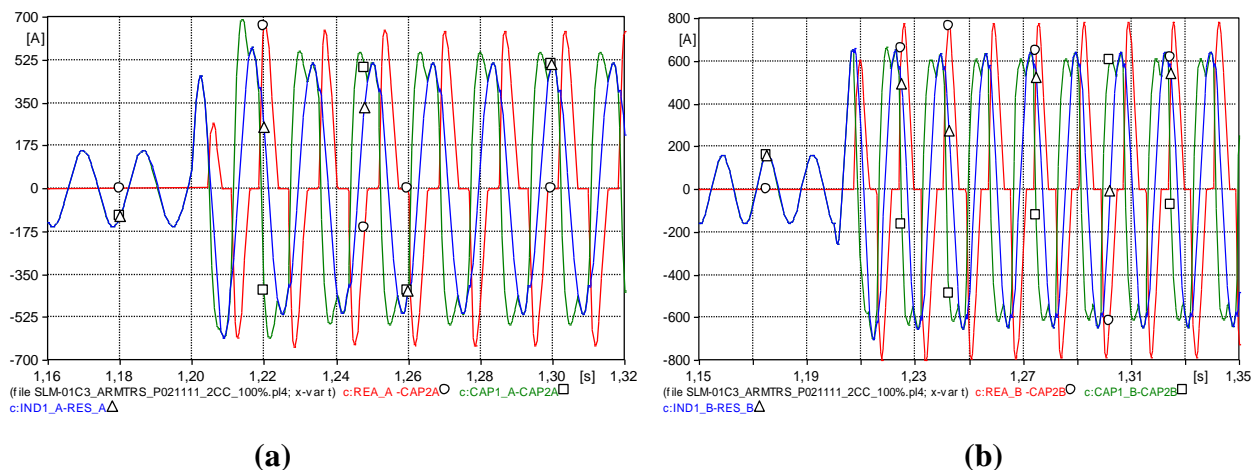


**Figura 2.43** – Histograma em pu da corrente fundamental para a fase C, devido a um curto-circuito bifásico entre as fases A e B, a 14,5km do ponto de suprimento, com o ARMTRS – ITA-03.

**Tabela 2.11** - Corrente Fundamental e harmônico na fase sã (C) devido a um curto-circuito bifásico com terra entre as fases A e B, a 14,5km do ponto de suprimento, com ARMTRS – ITA-03.

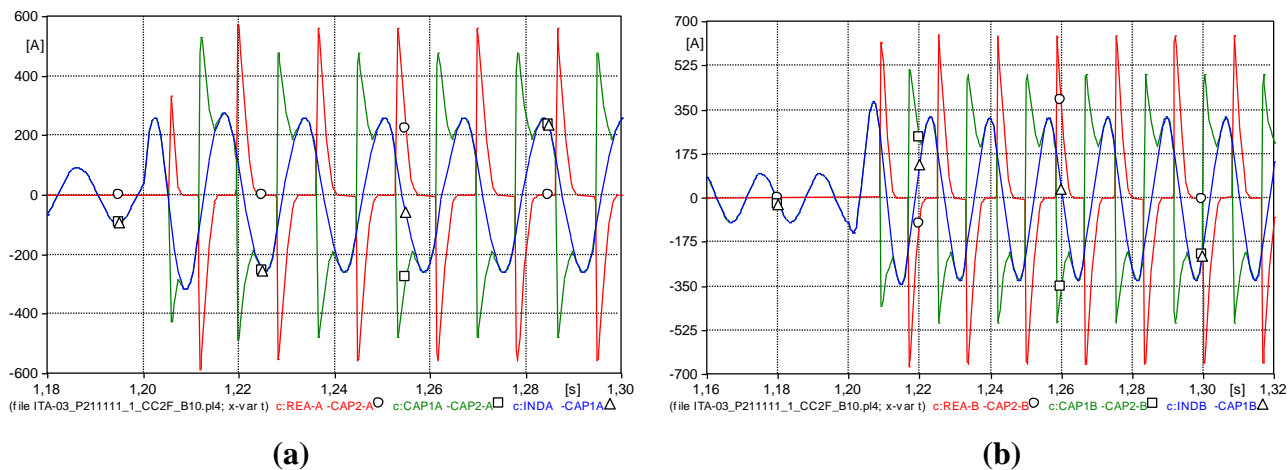
<i>Ordem harmônico</i>	<i>Amplitude (<math>A_{RMS}</math>)</i>	<i>Fase (Graus)</i>
<b>1</b>	1	153,41
<b>2</b>	4,31E-05	-12,816
<b>3</b>	1,65E-02	-114,62
<b>4</b>	1,64E-05	5,6291
<b>5</b>	1,28E-03	178,64
<b>THD=1,6594%</b>		

A Figura 2.44 apresenta as formas de onda das correntes no BCS, no RNS e a corrente total do sistema nas fases defeituosas, no instante que precedem o curto-circuito e durante sua ocorrência para o alimentador de SLM-01C3.



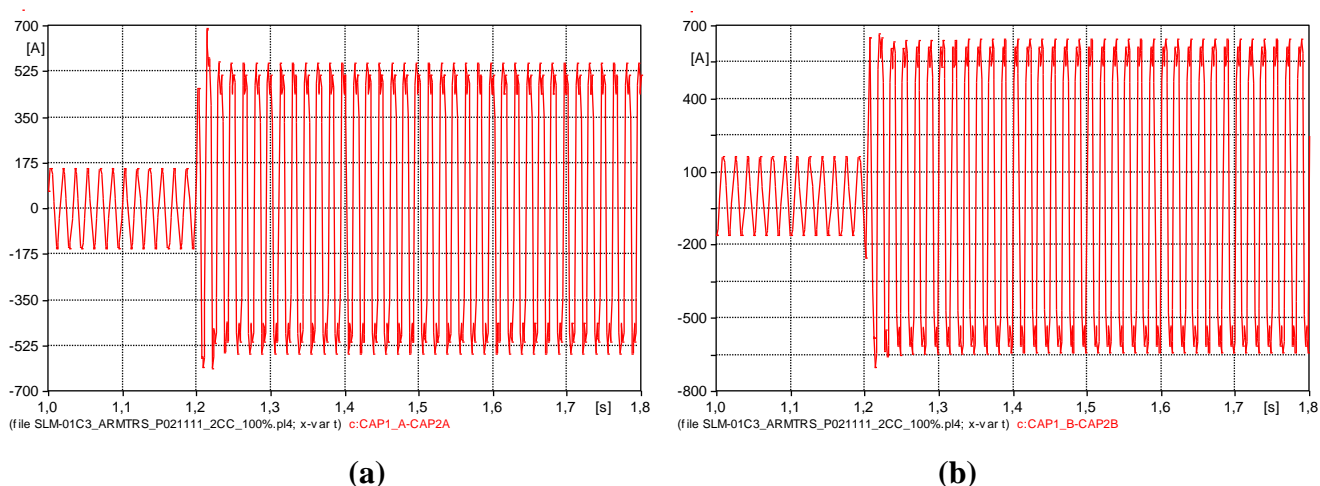
**Figura 2.44** – Forma de onda das correntes: (○) Corrente no RNS, (□) Corrente no BCS e (Δ) Corrente Total – (a) Fase A e (b) Fase B - SLM-01C3.

Já a Figura 2.45 apresenta as formas de onda das correntes no BCS, no RNS e a corrente total do sistema nas fases defeituosas, no instante que precedem o curto-circuito e durante sua ocorrência para o alimentador de ITA-03.



**Figura 2.45** – Forma de onda das correntes: (○) Corrente no RNS, (□) Corrente no BCS e (Δ) Corrente Total – (a) Fase A e (b) Fase B - ITA-03.

A Figura 2.46 mostra a forma de onda da corrente submetida ao BCS nas fases A e B antes e durante um defeito para o alimentador de SLM-01C3 e a Tabela 2.12 apresentam os valores eficazes das correntes nos BCS e em cada célula nas fases A e B durante o transitório.

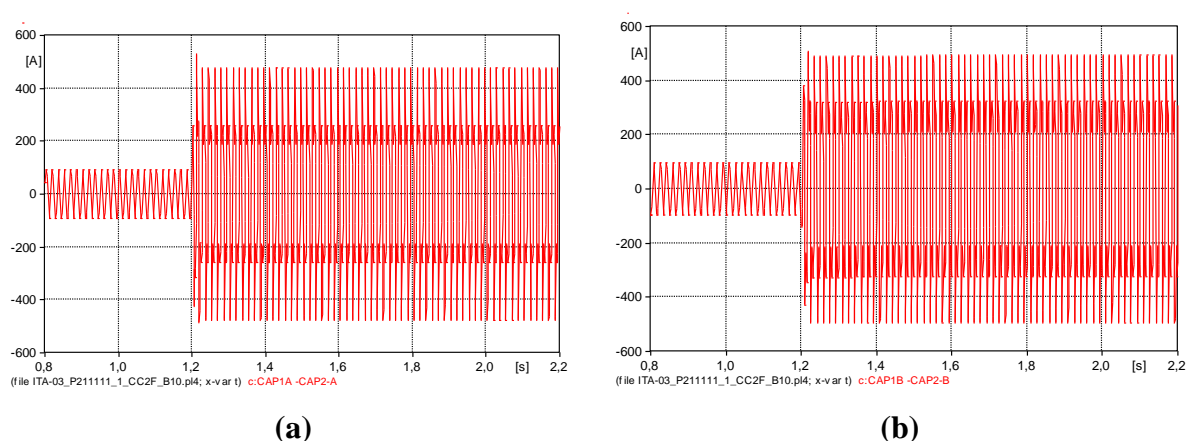


**Figura 2.46** – Forma de onda da corrente no BCS antes e durante um curto-circuito circuito bifásico com terra entre as fases A e B – (a) Fase A e (b) Fase B - SLM-01C3.

**Tabela 2.12** – Corrente no BCS e em cada célula durante um curto bifásico com a terra entre as fases A e B – SLM-01C3.

	$I_{bcs} (A_{rms})$	$i_{CÉLULA} (A_{rms})$
<b>Fase A</b>	489	122,2
<b>Fase B</b>	498	124,5

Já a Figura 2.47 mostra a forma de onda da corrente submetida ao BCS nas fases A e B antes e durante um defeito para o alimentador de SLM-01C3 e a Tabela 2.13 apresentam os valores eficazes das correntes nos BCS e em cada célula nas fases A e B durante o transitório.



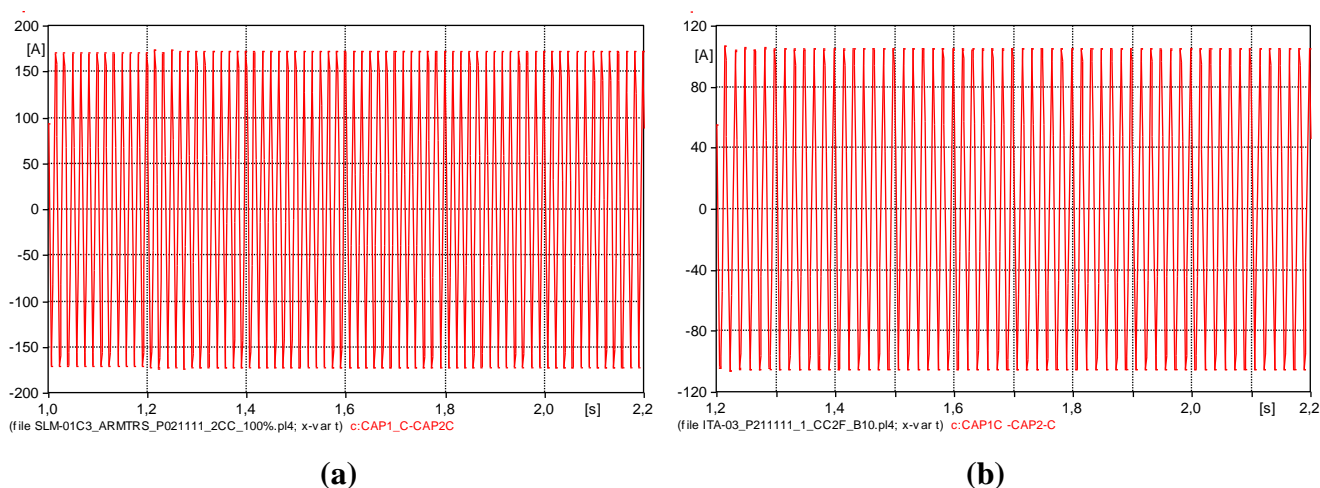
**Figura 2.47** – Forma de onda da corrente no BCS antes e durante um curto-circuito circuito bifásico com terra entre as fases A e B – (a) Fase A e (b) Fase B - ITA-03.

**Tabela 2.13** – Corrente no BCS e em cada célula durante um curto bifásico com a terra entre as fases A e B – ITA-03.

	$I_{bcS} (A_{rms})$	$i_{CÉLULA} (A_{rms})$
<b>Fase A</b>	375,4	62,6
<b>Fase B</b>	359,9	59,9

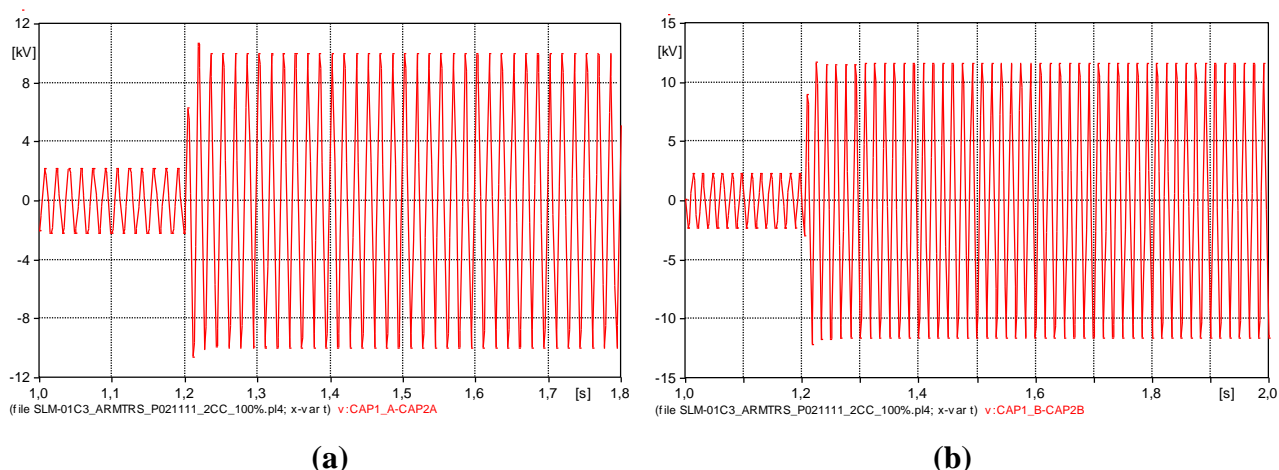
Segundo a curva de suportabilidade para 200A, a célula suporta 100 segundos o que corresponde a 6000 ciclos, ou seja, tempo superior a duração do curto que é de 60 ciclos para ambos alimentadores.

Na ocorrência de um curto-circuito bifásico com terra entre as fases A e B não foram observadas sobrecorrente no BCS na fase C para ambos alimentadores, ficando a corrente nessa fase em níveis adequados, conforme mostrado na Figura 2.48, para os alimentadores de SLM-01C3 e ITA-03, respectivamente.



**Figura 2.48** – Forma de onda da corrente no BCS na fase C durante um curto bifásico com terra entre as fases A e B – (a) SLM-01C3 e (b) ITA-03.

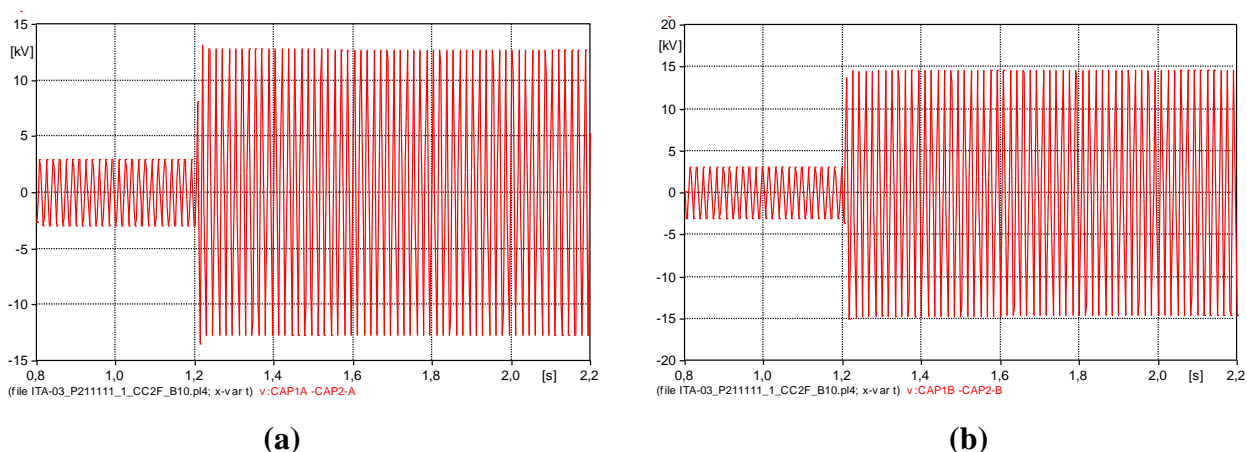
A Figura 2.49 mostra a forma de onda da tensão aplicada nos terminais do BCS nas fases A e B antes e durante um curto-circuito bifásico com terra localizado na barra de carga a 8,5km da fonte supridora para o alimentador de SLM-01C3.



**Figura 2.49** – Forma de onda da tensão nos terminais do BCS antes e durante um curto-circuito bifásico com terra – (a) Fase A e (b) Fase B - SLM-01C3.

Conforme mostraram os resultados de simulações, para o alimentador de SLM-01C3, o pico máximo de tensão aplicado no BCS em regime transitório é de aproximadamente igual a 10,7kV e 11,7kV nas fases A e B, respectivamente.

A Figura 2.50 mostra a forma de onda da tensão aplicada nos terminas do BCS nas fases A e B antes e durante um curto-circuito bifásico com terra localizado na barra de carga a 14,5km da fonte supridora para o alimentador de ITA-03.

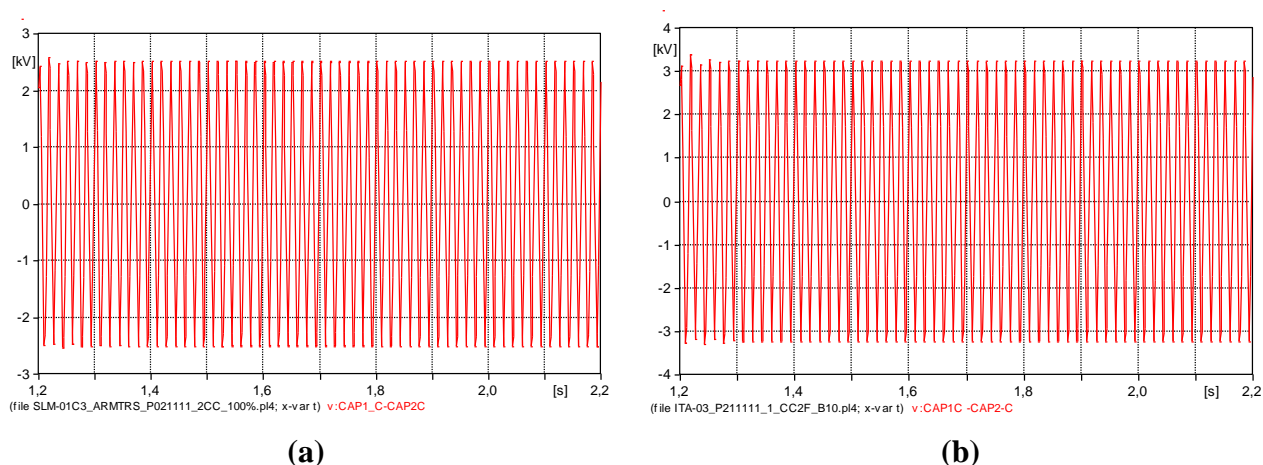


**Figura 2.50** – Forma de onda da tensão nos terminais do BCS antes e durante um curto-circuito bifásico com terra – (a) Fase A e (b) Fase b - ITA-03.

Conforme mostraram os resultados de simulações, para o alimentador de ITA-03, o pico de tensão aplicado no BCS em regime transitório é aproximadamente 13,5kV e 15,1kV nas fases A e B, respectivamente.



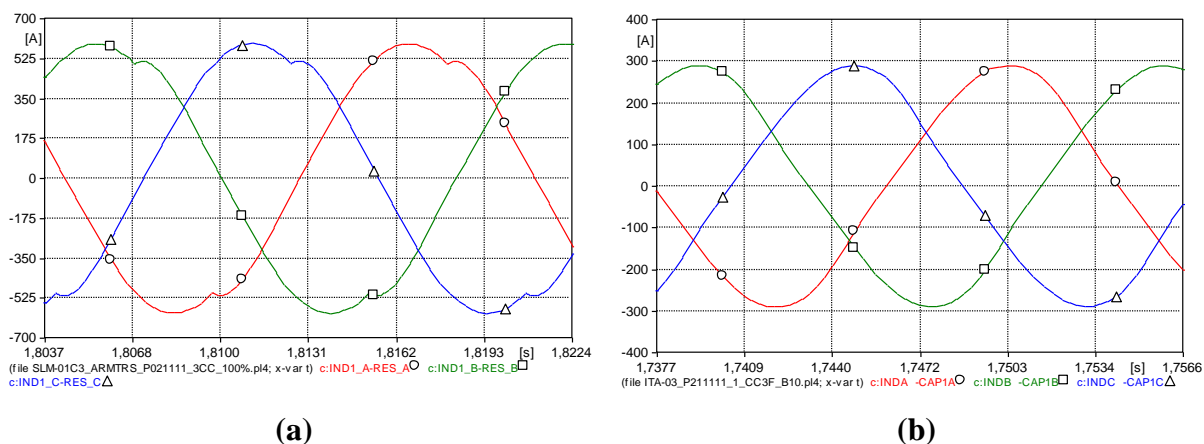
Na ocorrência de um curto-circuito bifásico com terra, não foram observadas sobretensão nos BCS na fase *sã* C, de ambos alimentadores, ficando a tensão nessa fase em níveis adequados, conforme mostrado na Figura 2.51.



**Figura 2.51** – Forma de onda da tensão no BCS na fase *sã* C durante um curto-circuito bifásico com terra – (a) SLM-01C3 e (b) ITA-03.

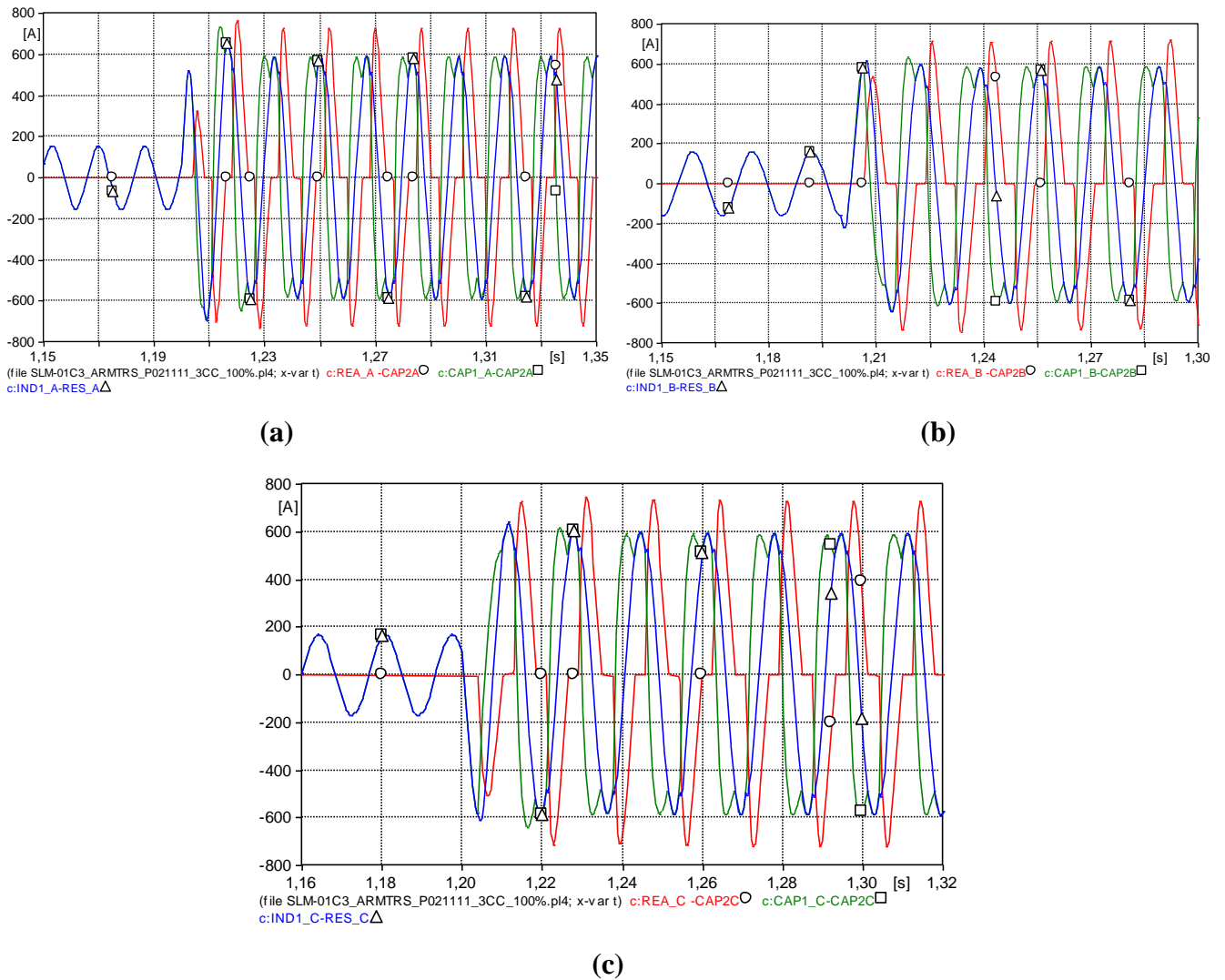
### 2.3.2.3 – Curto-circuito trifásico

A Figura 2.52 apresenta a forma de onda das correntes de carga das fases durante um curto-circuito trifásico, para o alimentador de SLM-01C3 e ITA-03, respectivamente.



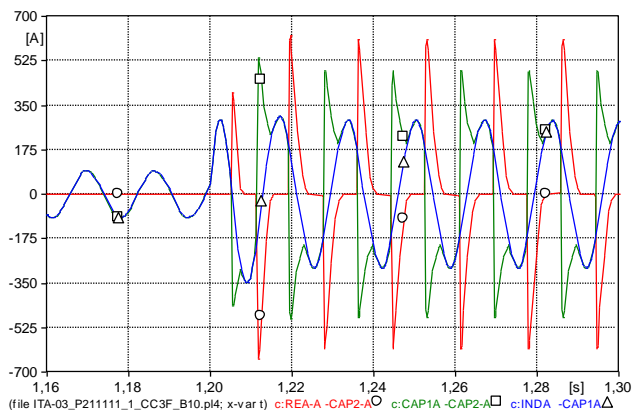
**Figura 2.52** – Corrente de carga durante um curto circuito trifásico – Fase A (○), fase B (□) e fase C (Δ) – (a) SLM-01C3 e (b) ITA-03.

A Figura 2.53 apresenta as formas de onda das correntes no BCS, no RNS e a corrente total do sistema nas três fases, no instante que precedem o curto-circuito e durante sua ocorrência para o alimentador de SLM-01C3.

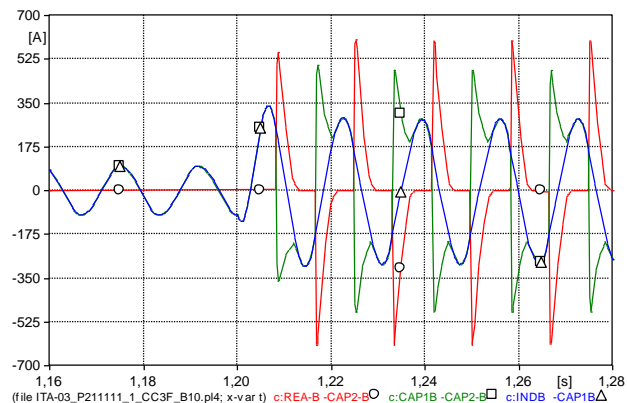


**Figura 2.53** – Forma de onda das correntes: (○) Corrente no RNS, (□) Corrente no BCS e (Δ) Corrente Total – (a) Fase A, (b) Fase B e (c) Fase C - SLM-01C3.

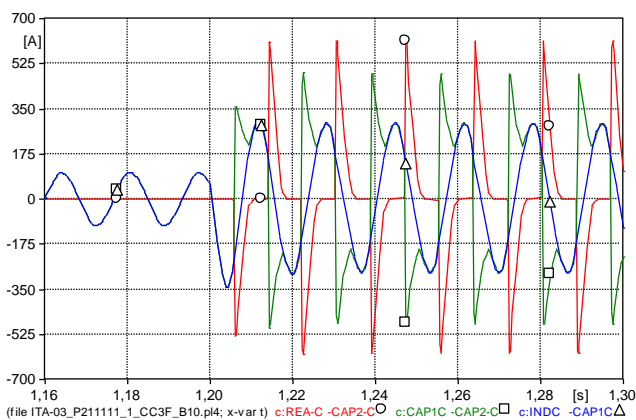
A Figura 2.54 apresenta as formas de onda das correntes no BCS, no RNS e a corrente total do sistema nas três fases, no instante que precedem o curto-circuito e durante sua ocorrência para o alimentador de ITA-03.



(a)



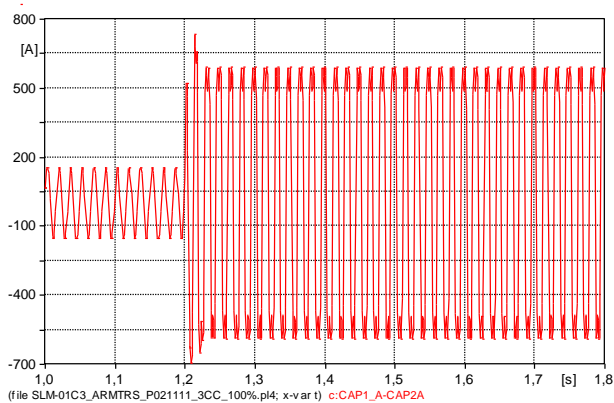
(b)



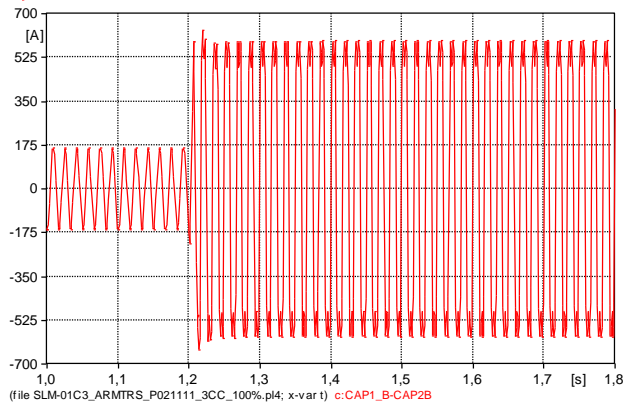
(c)

**Figura 2.54** – Forma de onda das correntes: (○) Corrente no RNS, (□) Corrente no BCS e (Δ) Corrente Total – (a) Fase A, (b) Fase B e (c) Fase C - ITA-03.

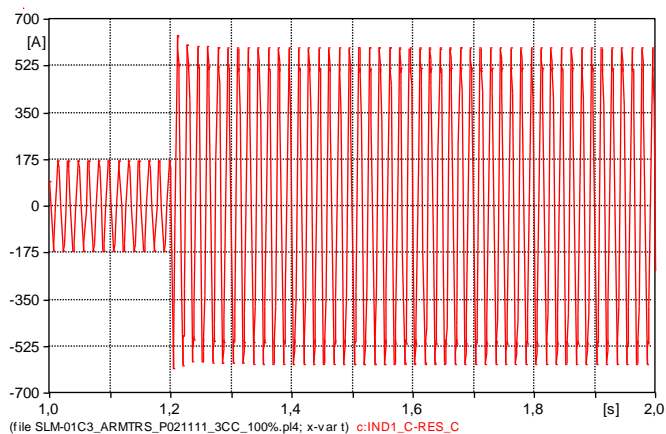
A Figura 2.55 mostra a forma de onda da corrente submetida ao BCS nas três fases antes e durante um defeito para o alimentador de SLM-01C3 e a Tabela 2.14 apresenta os valores eficazes das correntes nos BCS e em cada célula nas três fases durante o transitório.



(a)



(b)



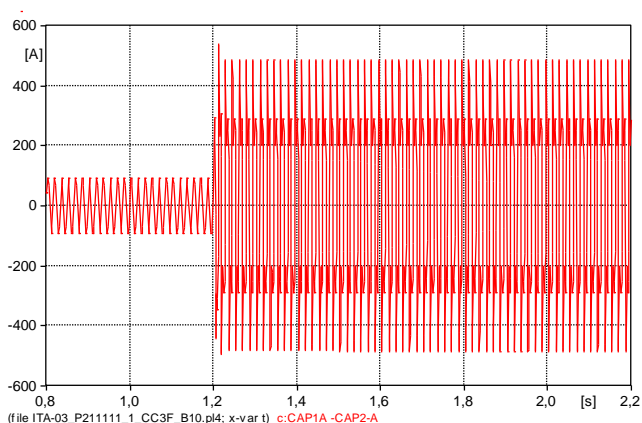
(c)

**Figura 2.55** – Forma de onda da corrente no BCS antes e durante um curto-circuito circuito trifásico – (a) Fase A, (b) Fase B e (c) Fase C - SLM-01C3.

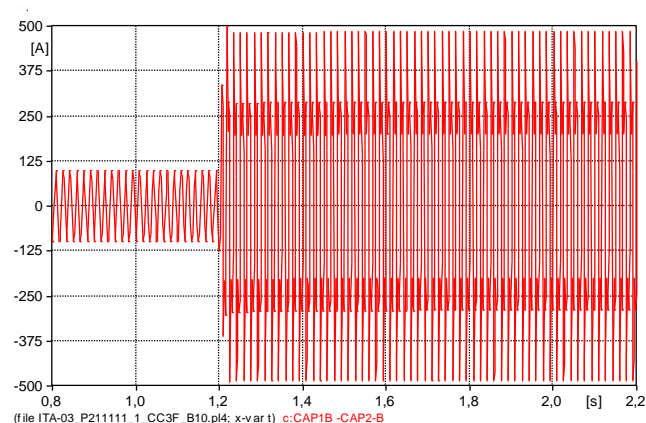
**Tabela 2.14** – Corrente no BCS e em cada célula durante um curto trifásico nas três fases – SLM-01C3.

	$I_{bcS} (A_{rms})$	$i_{CÉLULA} (A_{rms})$
<b>Fase A</b>	519	130
<b>Fase B</b>	455	114
<b>Fase C</b>	452	113

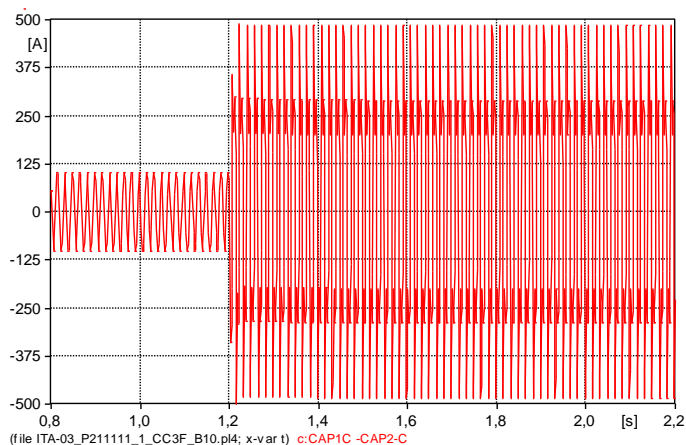
A Figura 2.56 mostra a forma de onda da corrente submetida ao BCS nas três fases antes e durante um defeito para o alimentador de ITA-03 e a Tabela 2.15 apresenta os valores eficazes das correntes nos BCS e em cada célula nas três fases durante o transitório.



(a)



(b)



(c)

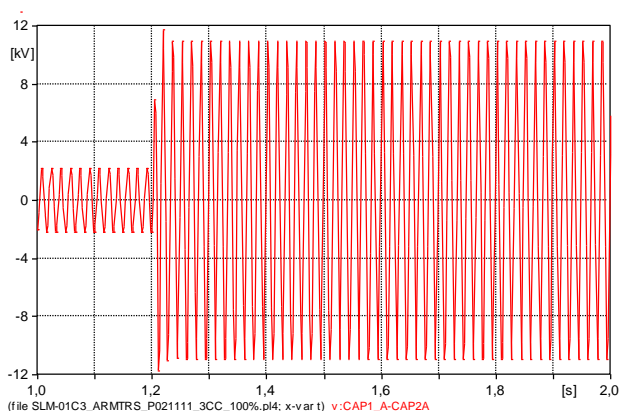
**Figura 2.56** – Forma de onda da corrente no BCS antes e durante um curto-circuito circuito trifásico – (a) Fase A, (b) Fase B, (c) Fase C - ITA-03.

**Tabela 2.15** – Corrente no BCS e em cada célula durante um curto trifásico nas três fases – ITA-03.

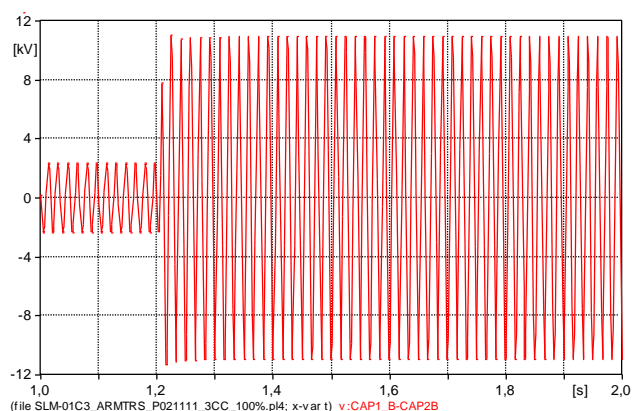
	$I_{bcs} (A_{rms})$	$i_{CÉLULA} (A_{rms})$
<b>Fase A</b>	379,5	63,2
<b>Fase B</b>	352,6	58,8
<b>Fase C</b>	352,9	58,8

Segundo a curva de suportabilidade para 200A, a célula suporta 100 segundos o que corresponde a 6000 ciclos, ou seja, tempo superior a duração do curto que é de 60 ciclos para ambos alimentadores.

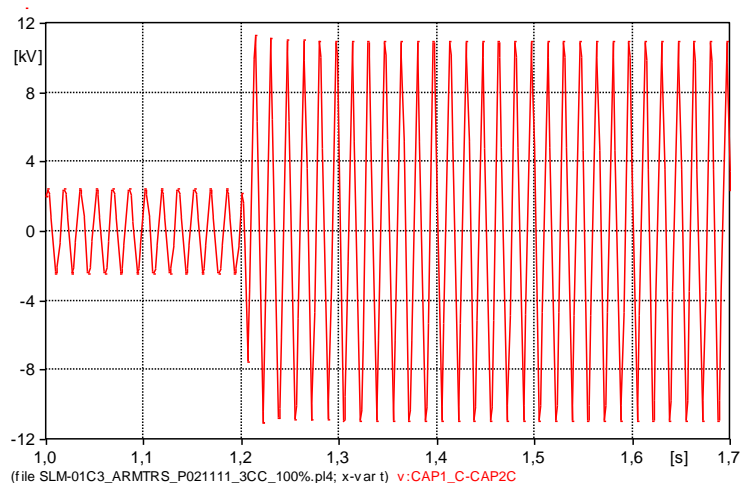
A Figura 2.57 mostra a forma de onda da tensão aplicada nos terminais do BCS nas três fases antes e durante um curto-circuito trifásico localizado na barra de carga a 8,5km da fonte supridora para o alimentador de SLM-01C3.



(a)



(b)

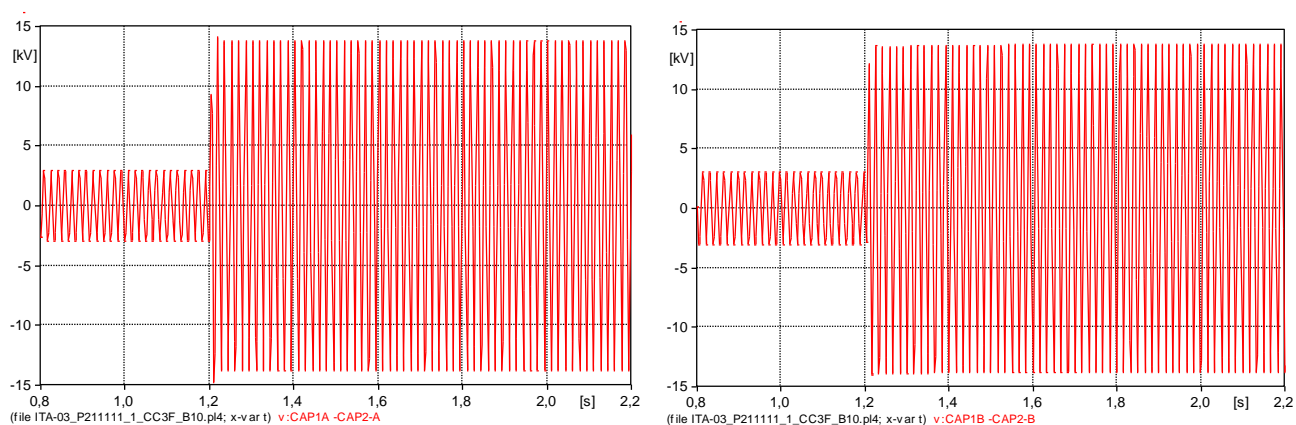


(c)

**Figura 2.57** – Forma de onda da tensão nos terminais do BCS antes e durante um curto-circuito trifásico – (a) Fase a, (b) Fase B e (c) Fase C - SLM-01C3.

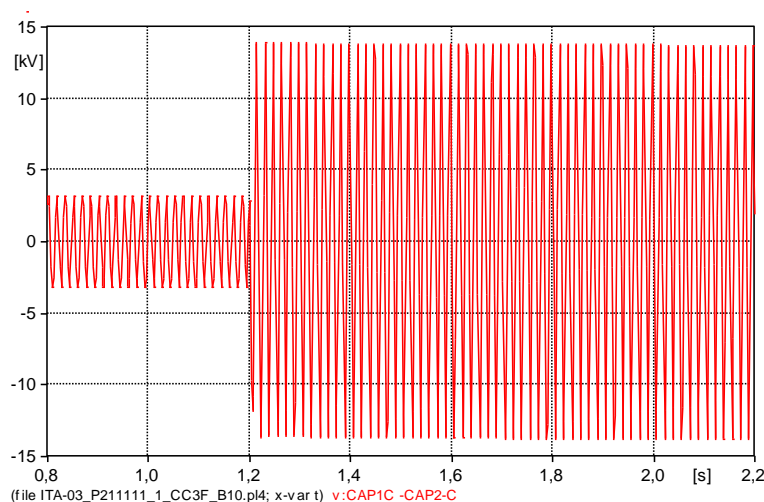
Conforme mostraram os resultados de simulações o pico máximo de tensão aplicado no BCS em regime transitório para o alimentador de SLM-01C3 é aproximadamente 11,7kV, 11,3kV e 11,3kV nas fases A, B e C, respectivamente.

A Figura 2.58 mostra a forma de onda da tensão aplicada nos terminais do BCS nas três fases antes e durante um curto-circuito trifásico localizado na barra de carga a 14,5km da fonte supridora para o alimentador de ITA-03.



(a)

(b)



(c)

**Figura 2.58** – Forma de onda da tensão nos terminais do BCS antes e durante um curto-circuito trifásico – (a) Fase A, (b) Fase B e (c) Fase C - ITA-03.

Conforme mostraram os resultados de simulações o pico máximo de tensão aplicado no BCS em regime transitório para o alimentador de ITA-03 é aproximadamente 14,7kV, 13,9kV e 13,9kV nas fases A, B e C, respectivamente.

A Tabela 2.16 mostra a frequência da ocorrência para cada tipo de curto circuito em sistema elétricos de distribuição, onde se pode observar que os curtos bifásicos e trifásicos se apresentam menos freqüentes que os curtos monofásicos.

**Tabela 2.16** – Composição probabilística entre o tipo das faltas e sua duração.

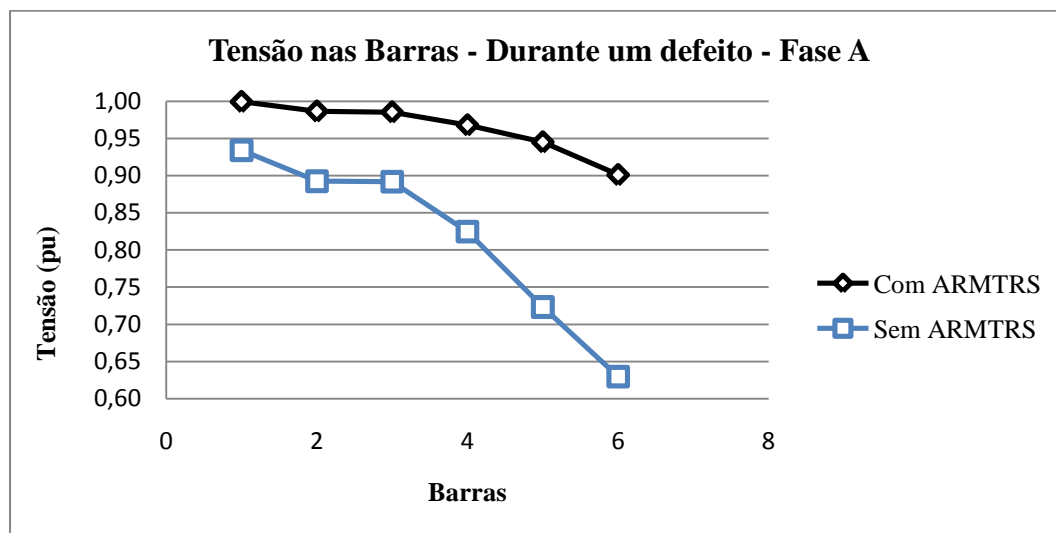
<i>Tipo de curto circuito</i>	<i>Ocorrências</i>	<i>Permanentes</i>	<i>Transitórios</i>
<b>Trifásico</b>	2%	95%	5%
<b>Bifásico</b>	11%	70%	30%
<b>Fase/Terra</b>	79%	20%	80%
<b>Outros</b>	8%	-	-

Fonte: GIGUER, S. 1988, p.33.

### 2.3.3 – Controle do afundamento de tensão

Além de exercer a função de limitador de corrente de curto-circuito o reator linear em série com o banco de capacitores foi utilizado no ARMTRS também com o objetivo de permitir o suprimento das cargas a montante do equipamento durante um curto-circuito, até que o defeito seja auto-extinguido ou eliminado pela proteção. Pode-se considerar o

controle de afundamento e elevação de tensão, durante um defeito, promovido pelo reator linear série como um benefício adicional oferecido pelo ARMTRS ao sistema como podem ser observados na Figura 2.59 e na Tabela 2.17 para o alimentador de SLM-01C3.



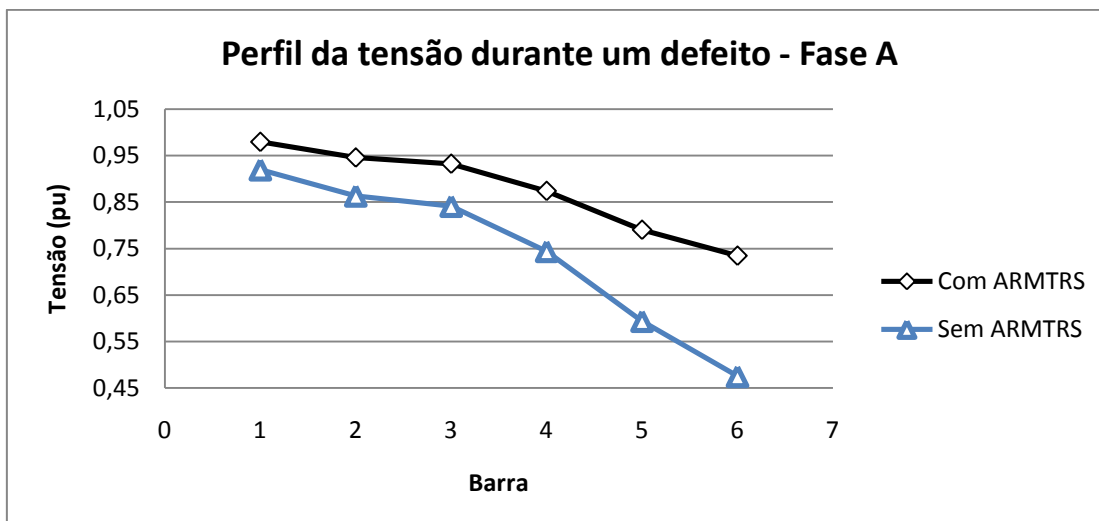
**Figura 2.59** – Perfil de tensão para cargas conectadas a montante do ARMTRS durante um curto-circuito a jusante na fase A – SLM-01C3.

**Tabela 2.17** – Tensão em pu a montante do ARMTRS durante um curto-circuito monofásico na fase A a jusante do ARMTRS – SLM-01C3.

Barra	Fase A		Fase B		Fase C	
	$V_{pu}$		$V_{pu}$		$V_{pu}$	
	Sem ARMTRS	Com ARMTRS	Sem ARMTRS	Com ARMTRS	Sem ARMTRS	Com ARMTRS
1	0,93	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
2	0,89	0,99	1,01	1,00	1,00	0,99
3	0,89	0,99	1,01	1,01	1,00	0,99
4	0,82	0,97	1,03	1,01	0,99	0,97
5	0,72	0,95	1,06	1,01	0,98	0,94
6	0,63	0,90	1,03	1,00	0,94	0,92

Para o alimentado de ITA-03, diferentemente do de SLM-01C3, inicialmente, observou-se com os resultados de simulação que durante um defeito a tensão em alguns trechos a montante do ARMTRS afundava mesmo com a presença desse equipamento, como pode ser visto nas Figuras 2.60 e na Tabela 2.18.





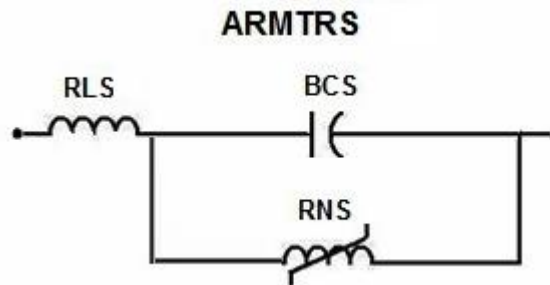
**Figura 2.60** – Perfil de tensão para cargas conectadas a montante do ARMTRS durante um curto-circuito monofásico na fase A a jusante do ARMTRS – ITA-03 (Projeto sem ajuste).

**Tabela 2.18** – Tensão em pu a montante do ARMTRS durante um curto-circuito monofásico na fase A a jusante do ARMTRS – ITA-03 (Projeto sem ajuste).

Barra	Fase A		Fase B		Fase C	
	V <sub>pu</sub>		V <sub>pu</sub>		V <sub>pu</sub>	
	Sem ARMTRS	Com ARMTRS	Sem ARMTRS	Com ARMTRS	Sem ARMTRS	Com ARMTRS
1	0,92	0,98	1,00	1,00	1,00	1,00
2	0,86	0,94	1,00	1,00	0,99	0,98
3	0,84	0,93	1,00	1,00	0,99	0,97
4	0,74	0,87	1,01	1,00	0,97	0,94
5	0,59	0,79	1,03	1,01	0,94	0,89
6	0,48	0,73	1,06	1,03	0,94	0,86

A alternativa encontrada para controlar esses afundamentos foi reduzir a corrente de curto circuito do sistema. Para que isso fosse possível, fez-se necessário aumentar a reatância do RLS o que refletiu no peso da estrutura ferromagnética, como será visto no capítulo 3, tornando-a mais robusta e pesada. Outro fator que deve ser levado em consideração é a capacitância líquida que o sistema precisa para regular a tensão na barra de carga mais distante, ou seja, o reator linear deve ser projetado de forma tal que seja possível uma combinação de células capacitivas com as células padrões normalmente usadas. O projeto do RNS e RLS foi ajustado de forma a atender todos os benefícios proposto pelo ARMTRS, inicialmente propôs que a arquitetura adotada seria aquela mostrada na Figura 1.1, com essas modificações todo o RLS passou a ser usado para

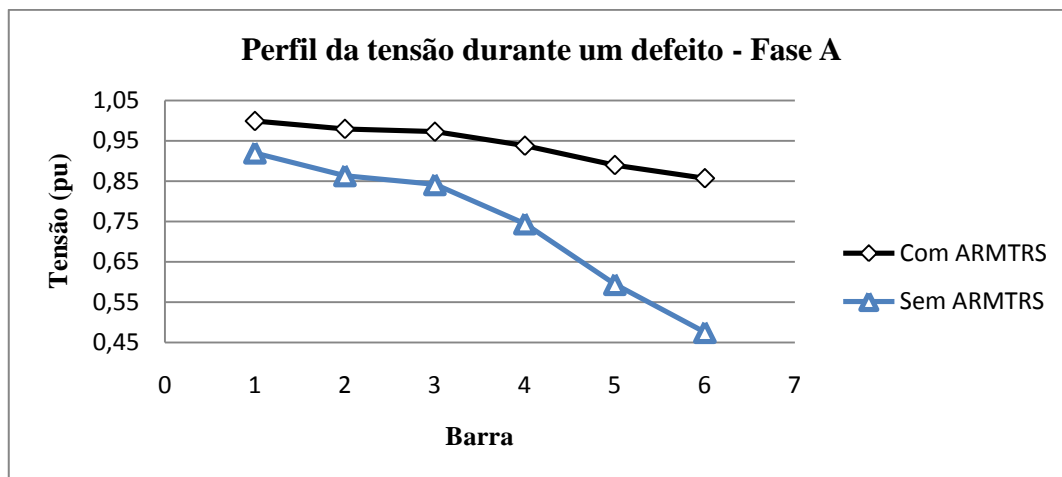
diminuir a corrente de curto-circuito, ou seja, a arquitetura agora adotada é mostrada na Figura 2.61.



**Figura 2.61** – Arquitetura do ARMTRS para o alimentador de ITA-03.

Com essa arquitetura a tensão nos terminais do RNS passa a ser a tensão aplicada ao BCS, ou seja, é maior do que a tensão da arquitetura mostrada na Figura 1.1, que antes era a queda de tensão entre o BCS e parte do RLS. Essa mudança influencia na tensão de saturação do RNS que passa a ser maior, e quando a tensão de saturação do RNS aumenta, a tensão nos terminais do BCS também aumenta. Durante um defeito foram observadas picos de tensões transitória nos terminais do BCS entre 14 e 15kV, as células de 200 e 300kVAr com tensão nominal de 4,16kV não suportam essas sobretensões, a alternativa encontrada foi usar as células de 400kvar com tensão nominal de 8,66kV que suportam sobretensões de até 24,4kV. A reatância nominal dessa célula é de 187,4 $\Omega$  tornando-se necessário 5 (cinco) células em paralelo, se por ventura uma célula vier a ser danificada sobrecarregaria o banco, e por isso em vez de 5 (cinco) células foram usadas 6 (seis) células o que resulta numa reatância de 31,25 $\Omega$  e para manter a capacitância líquida do sistema que é de aproximadamente 13 $\Omega$  o RLS foi projetado com uma reatância de 19 $\Omega$ , ou seja, para reatâncias do RLS acima desse valor seria necessário diminuir a reatância do BCS e com isso usar menos células, no entanto, para esse projeto o número mínimo de células para se manter dentro dos limites assegurados pelas normas seria de 5 (cinco) células capacitivas.

A Figura 2.62 e a Tabela 2.19 mostram o perfil da tensão a montante do ARMTRS durante um defeito a jusante para a fase defeituosa.



**Figura 2.62** – Perfil de tensão para cargas conectadas a montante do ARMTRS durante um curto-circuito a jusante na fase A – ITA-03.

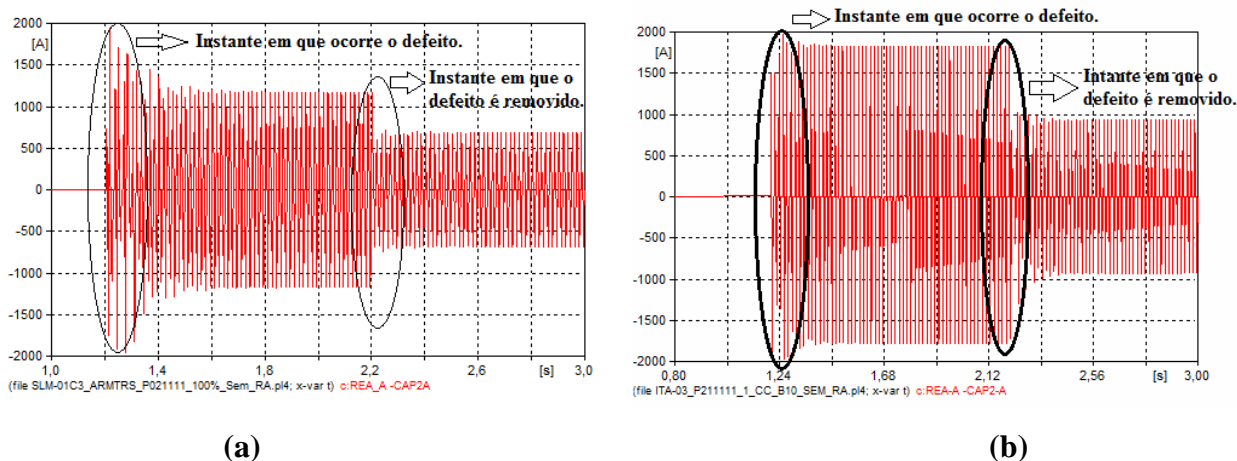
**Tabela 2.19** – Tensão em pu a montante do ARMTRS durante um curto-circuito monofásico na fase A a jusante do ARMTRS – ITA-03.

Barra	Fase A		Fase B		Fase C	
	$V_{pu}$		$V_{pu}$		$V_{pu}$	
	Sem ARMTRS	Com ARMTRS	Sem ARMTRS	Com ARMTRS	Sem ARMTRS	Com ARMTRS
1	0,92	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
2	0,86	0,98	1,00	0,99	0,99	0,98
3	0,84	0,97	1,00	0,99	0,99	0,98
4	0,74	0,94	1,01	0,99	0,97	0,95
5	0,59	0,90	1,03	0,98	0,94	0,90
6	0,48	0,86	1,06	0,98	0,94	0,87

### 2.3.4 – Análise do ARMTRS após a remoção do defeito

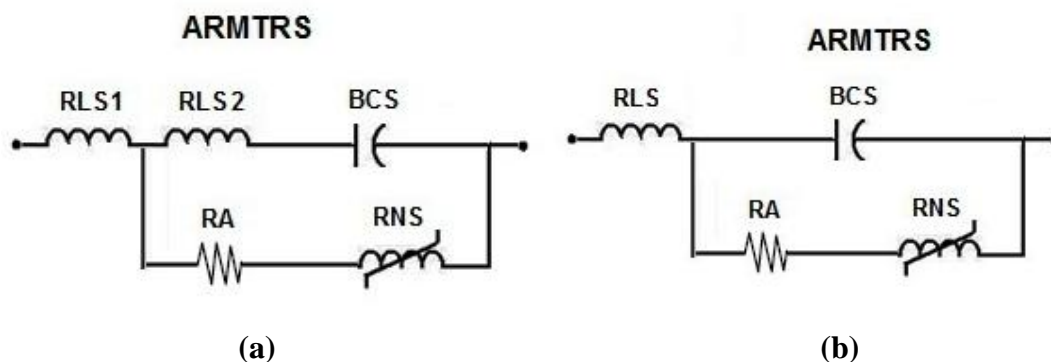
Foram feitas simulações com o sistema em regime normal de operação, com o sistema sob a influência de um curto circuito e com a retirada desse defeito. É importante analisar o instante em que o defeito se extingue para avaliar o tempo de reação do RNS em sair do seu estado de saturação. Observou-se nas simulações que depois da retirada do defeito o RNS não sai de seu estado de saturação, devido à troca de energia entre o BCS e o RNS.

A Figura 2.63 mostram a forma de onda da corrente no reator saturado para o alimentador de SLM-01C3 e ITA-03, respectivamente, no instante que precede o defeito, durante o defeito e logo após esse defeito ser extinguido.



**Figura 2.63** – Forma de onda da corrente no reator saturado, antes, durante e depois um defeito – (a) SLM-01C3 e (b) ITA-03.

Visando dissipar a energia armazenada entre o BCS e o RNS durante a ocorrência de curtos-circuitos, uma resistência de amortecimento foi instalada em série com o reator saturado, conforme mostrado na Figura 2.64 para o alimentador de SLM-01C3 e ITA-03.

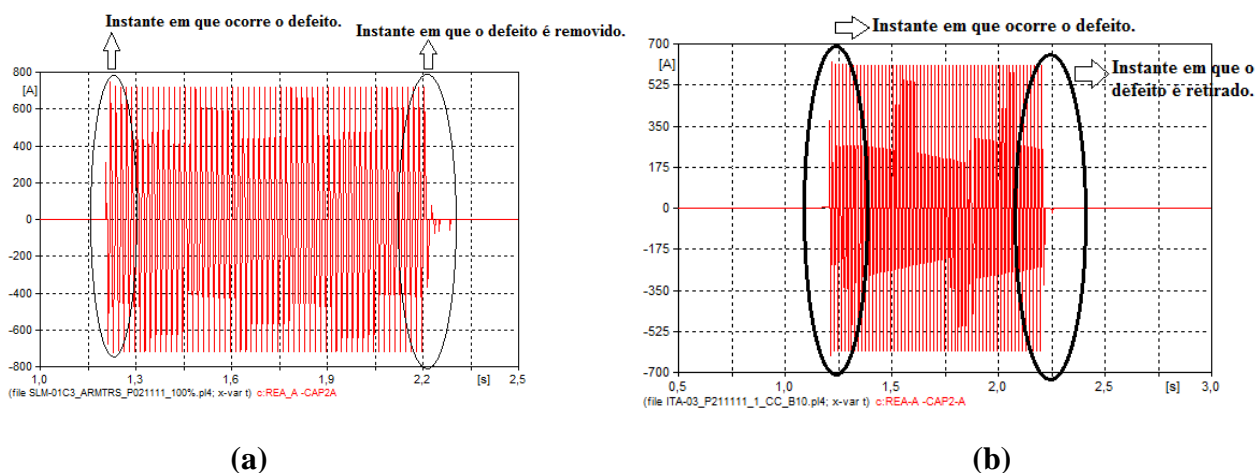


**Figura 2.64** – Arquitetura do ARMTRS com resistência de amortecimento – (a) SLM-01C3 e (b) ITA-03.

Para analisar os efeitos e o valor necessário em ohms da resistência de amortecimento na dessaturação do RNS, o ARMTRS foi posto em uma barra infinita. Verificou-se que seria necessária uma resistência de 10 ohms para que o RNS saísse de saturação depois da retirada do curto-circuito para o alimentador de SLM-01C3 e uma de 20 ohms para ao alimentador de ITA-03.

A Figura 2.65 mostra a forma de onda da corrente no RNS durante um curto-circuito, com a presença da resistência de amortecimento para ambos alimentadores. Pode-se observar que com a introdução dessa resistência de amortecimento o reator saturado sai

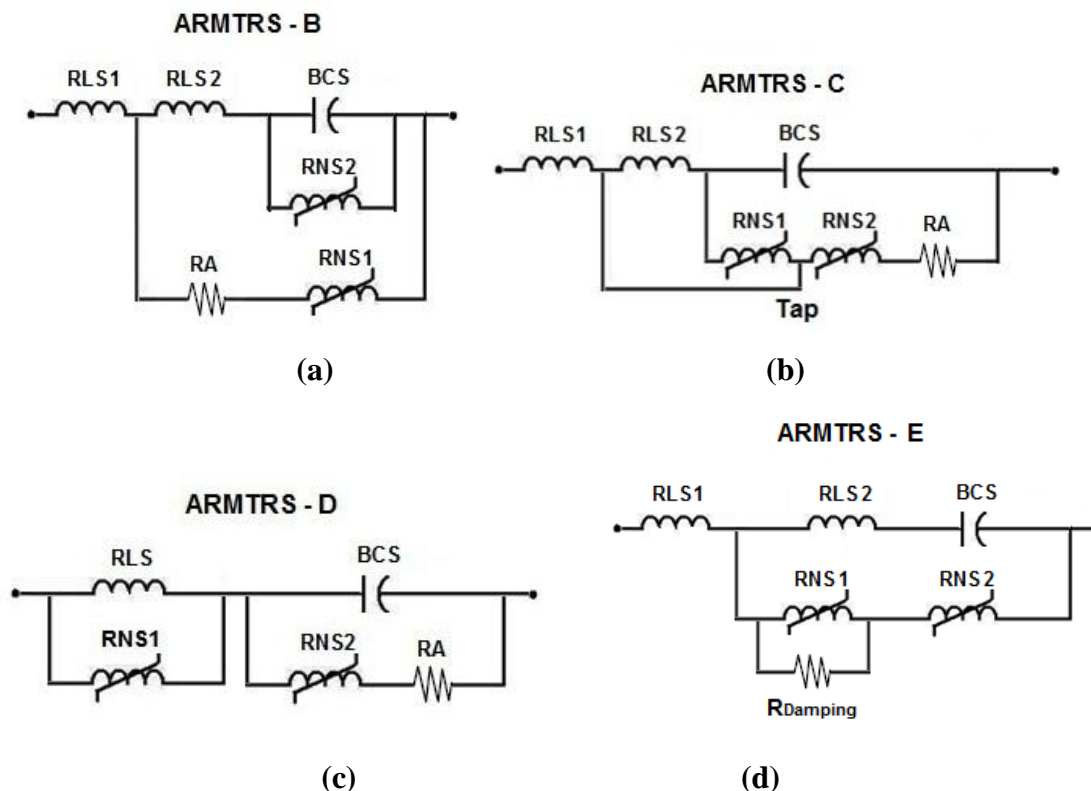
de saturação em poucos ciclos quando o defeito é removido sem o desligamento da fonte, comprovando a eficiência da sua utilização.



**Figura 2.65** – Forma de onda da corrente no RNS antes, durante e depois um defeito com resistência de amortecimento – (a) SLM-01C3 e (b) ITA-03

Além de acrescentar em série com o reator naturalmente saturado uma resistência de amortecimento também foram feitas outras análises para o ARMTRS com arquiteturas distinta daquela proposta na Figura 2.64 (a) para o alimentador de SLM-01C3, para o alimentador de ITA-03 foi mantido a arquitetura proposta na Figura 2.64 (b).

A Figura 2.66 mostra as outras arquiteturas estudadas. A arquitetura denominada de ARMTRS-B consiste em dois reatores saturados, um em shunt com o BCS e outro shunt com o conjunto BCS e RLS. A arquitetura denominada de ARMTRS-C consiste em um único reator saturado, porém com a presença de um tap em que parte do reator saturado é ligada em shunt com o RLS e a outra parte em shunt com o conjunto BCS e RLS. A arquitetura denominada de ARMTRS-D consiste em dois reatores saturados, um em shunt com o RLS e outro em shunt com BCS. E por último a arquitetura denominada de ARMTRS-E a qual é composta por dois reatores saturados ambos em série e em shunt com o conjunto BCS e RLS, a diferença dessa arquitetura para as demais é a presença de um *Resistor Damping* em paralelo com um dos RNS [6].



**Figura 2.66** – (a) Arquitetura ARMTRS – B; (b) Arquitetura ARMTRS – C; (c) Arquitetura ARMTRS – C e (d) Arquitetura ARMTRS – D;

A Tabela 2.20 mostra os resultados obtidos para todas as arquiteturas estudadas. Observou-se que para todas as arquiteturas a resistência de amortecimento se faz necessária. Levando em consideração o tempo em que o RNS sai de seu estado de saturação depois da remoção de um defeito e o peso da estrutura, chegou-se a conclusão que a arquitetura ARMTRS-A proposta desde o início é a melhor arquitetura a ser adotada.

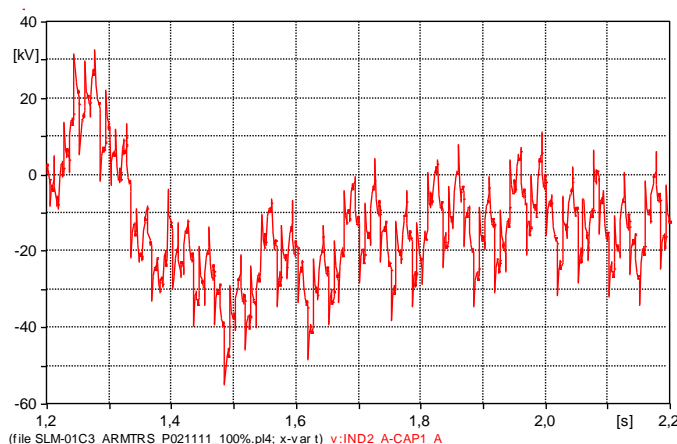
**Tabela 2.20** – Resultados obtidos para os cinco tipos de arquitetura do ARMTRS.

	$R_a$ ( $\Omega$ )	Ciclos - Duração do defeito	Ciclos - Amortecimento	$V_{BCS\_Trans}$ ( $kV_{PICO}$ )	Peso – ARMTRS ( $kg/fase$ )
<b>ARMTRS - A</b>	10	60	3	11,4	436,7
<b>ARMTRS - B</b>	10	60	3	9,2	733,6
<b>ARMTRS - C</b>	10	60	1	18,6	550,9
<b>ARMTRS - D</b>	10	60	4	10,8	493,7
<b>ARMTRS - E</b>	10	60	1	12,4	549

No Apêndice 6.9 são mostradas as figuras de onda da tensão no BCS e a corrente no RNS para todas as arquiteturas estudadas.

### 2.3.5 – Análise do RLS durante um defeito

Conforme observados nas simulações, durante a ocorrência do curto circuito, o reator linear série do alimentador de SLM-01C3 que é constituído pela arquitetura mostrado na Figura 2.64 (a) sofre variações brusca de tensão (*spikes*) como pode ser verificado na Figura 2.67, chegando a picos de tensão de aproximadamente 55kV .

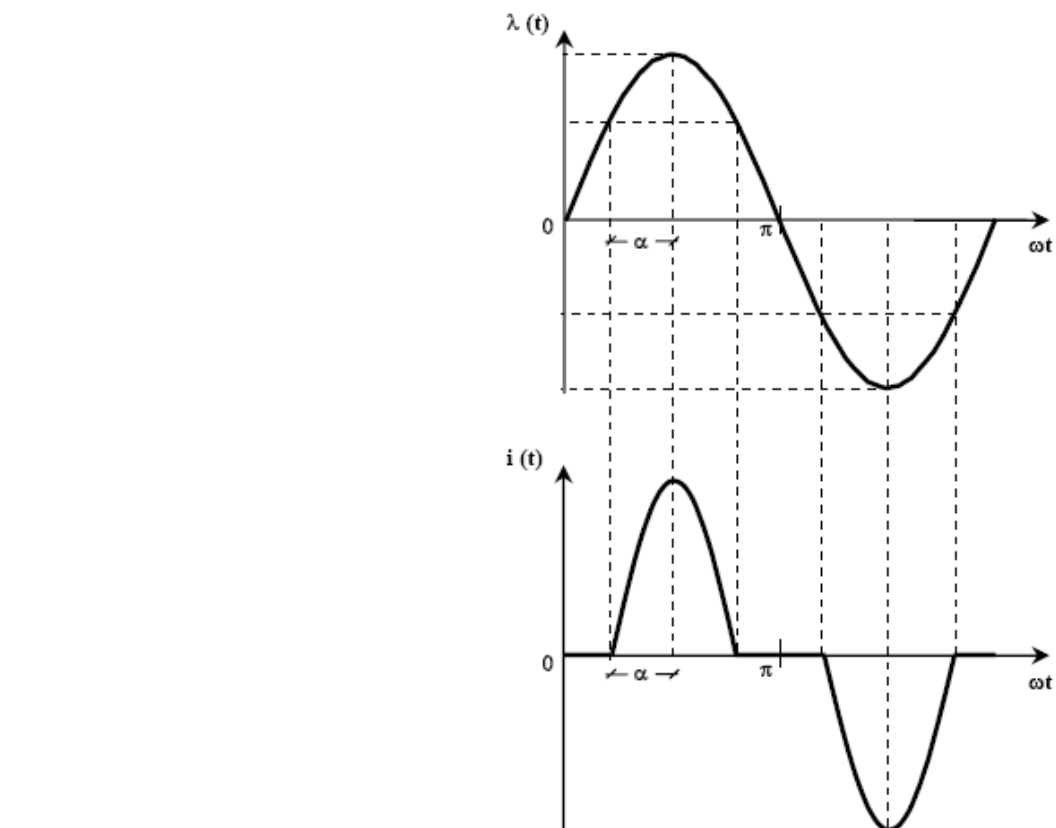


**Figura 2.67** – Forma de onda da tensão no reator linear durante um defeito – SLM-01C3.

Esse fenômeno ocorre, pois em qualquer instante a queda de tensão no indutor é proporcional à razão de variação da corrente com relação ao tempo, então quanto mais rapidamente variar a corrente numa dada variação de tempo, maior será a tensão nos terminais do indutor como mostra a expressão 2.2.

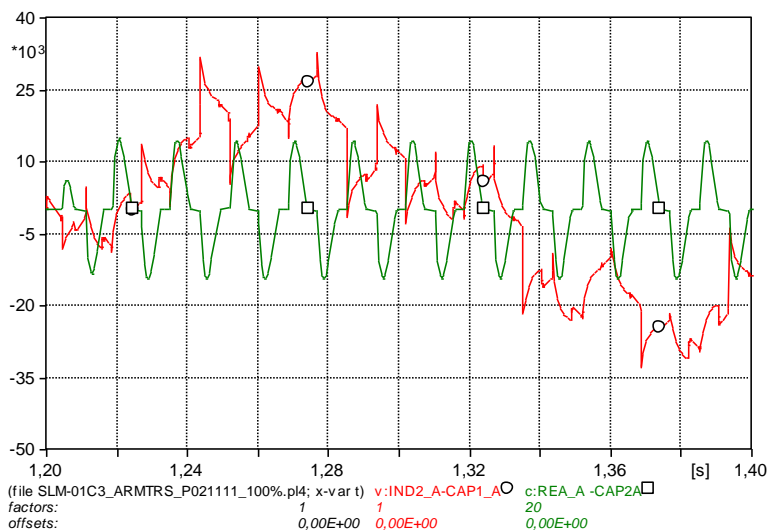
$$v = L \frac{di}{dt} \quad (2.2)$$

Ou seja, a corrente que circula através de um indutor não pode ter seu valor alterado de uma quantidade finita, instantaneamente, pois isso implicará em uma tensão infinita neste instante. Como foi mostrado na Figura 2.64 (a) parte do reator linear está conectada em paralelo com o reator naturalmente saturado que durante um curto circuito ora está em seu estado de saturação, no intervalo  $\omega t = 2\alpha$ , sendo a corrente limitada pela indutância de saturação, como pode ser visto na Figura 2.68, e ora está no seu estado de não saturação, no intervalo  $(\pi - 2\alpha)$  sendo a corrente nesse intervalo nula conforme descrito em [7].



**Figura 2.68** – Comportamento do reator naturalmente saturado com tensão senoidal aplicado aos seus terminais.

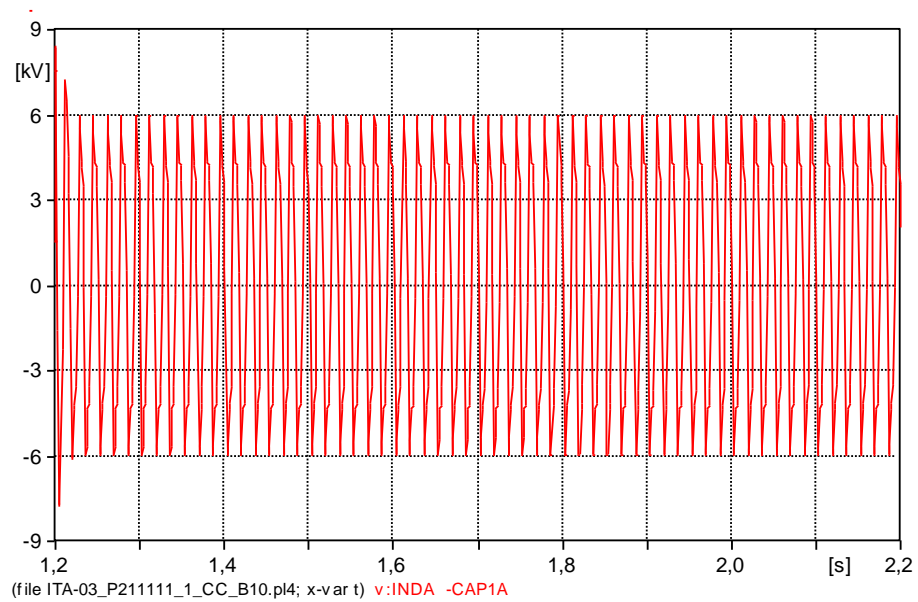
A Figura 2.69 mostra o comportamento da tensão sobre o reator linear e da corrente do reator naturalmente saturado durante um defeito. A corrente do RNS foi aumentada em 20 vezes para melhor visualização.



**Figura 2.69** – Forma de onda da tensão no RLS (○) e da corrente no RNS (□) durante um defeito – SLM-01C3.



No alimentador de ITA-03 essas variações bruscas de tensão não foram observadas, devido à arquitetura desse sistema, como mostrado na Figura 2.64 (b). A Figura 2.70 mostra a forma de onda do reator linear durante um defeito.



**Figura 2.70** – Forma de onda da tensão no RLS durante um defeito – ITA-03.

## CAPITULO 3

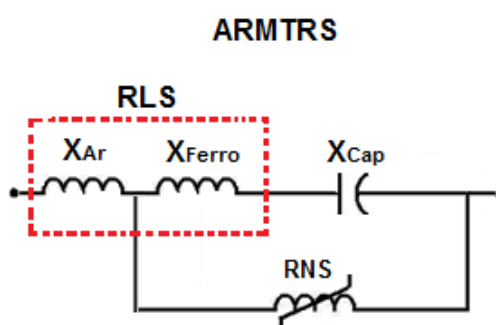
### DIMENSIONAMENTO DO ARMTRS -13,8kV - CABEÇA DE SÉRIE

#### 3.1 – Considerações preliminares

Dos três componentes do ARMTRS mostrados na Figura 1.1, o BCS não deverá ser alvo de considerações especiais, pois, células capacitivas são ofertadas comercialmente por várias empresas do setor industrial brasileiro e a CELPE é uma usuária habitual desses produtos para a compensação em derivação das linhas e cargas.

Os procedimentos de cálculos usados para a construção dos componentes do ARMTRS mostrado neste trabalho terá como base o alimentador de SLM-01C3, tendo em vista que a rotina de cálculo é a mesma para qualquer que seja o alimentador.

O RLS foi decomposto em duas partes como mostra a Figura 3.1, uma parte do reator linear ( $X_{\text{Ferro}}$ ) é conectado em série com BCS e esse conjunto ligado em shunt com o reator saturado. A outra parte do RLS ( $X_{\text{Ar}}$ ) exerce a função de limitador de corrente de curto-circuito. Essa bifurcação do RLS foi adotada com intuito de se ter apenas uma parcela do reator linear para limitar a corrente de curto-circuito e não todo o RLS exercendo essa função. Uma característica dessa arquitetura é que a parcela do RLS em série com o BCS diminui a tensão nos terminais do RNS e com isso o reator saturado pode ser dimensionado com tensão de saturação mais baixa refletindo no peso da estrutura magnética, porém, essa divisão vai depender das necessidades do sistema elétrico a ser instalado o ARMTRS.



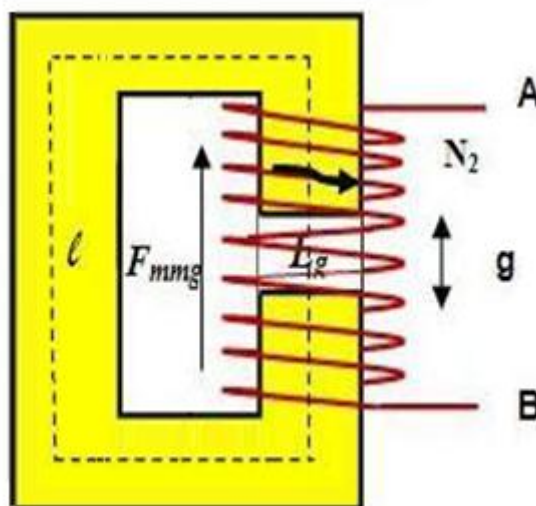
**Figura 3.1** – Decomposição do RLS na Arquitetura do ARMTRS para o alimentador de SLM-01C3.

A parte do reator linear destinada a limitar a corrente de curto-circuito será dimensionada como um núcleo de ar, enquanto a outra parcela do reator linear em shunt com RNS será dimensionado como uma estrutura ferromagnética.

O reator linear série constitui num produto adquirido regularmente pelas empresas do setor elétrico tanto para a função de compensação das linhas de transmissão, como para o papel de limitação da corrente de curto-circuito. Os reatores com essas finalidades são fabricados com duas versões distintas:

- Reatores com núcleo de material ferromagnético;
- Reatores com núcleo de ar.

Nas aplicações para compensação, o RLS é conectado em derivação nos terminais das linhas de alta e extra-alta tensão, possuem potências elevadas e são construídos aos moldes dos transformadores. Porém, ao contrário desses equipamentos, os reatores exibem um núcleo de material ferromagnético com entreferros para garantir a relação linear entre a tensão e a corrente solicitada pelos mesmos. Um leiaute típico da parte ativa de um reator linear com essa conformação é apresentado na Figura 3.2 e, em geral, esse conjunto é imerso em óleo isolante num tanque metálico dispendo de elementos para dissipação do calor gerado.



**Figura 3.2** – Esquemático do RLS com núcleo de ferro.

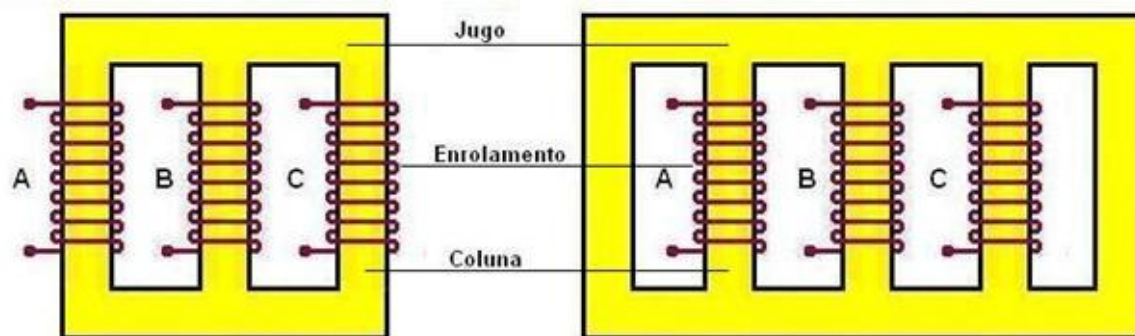
Nas aplicações para limitação das correntes de curto-circuito, os reatores lineares são conectados em série na rede elétrica, tal como na arquitetura proposta na Figura 3.1 para o ARMTRS. A opção construtiva habitualmente utilizada com essa finalidade faz uso de uma estrutura com núcleo de ar, como ilustra a Figura 3.3 para um reator de alta-tensão.



**Figura 3.3** – Reator Linear Série com núcleo de ar aplicado em alta-tensão.

O RNS é, dentre os equipamentos constituintes do ARMTRS, o único que não faz parte do portfólio das empresas fornecedoras do setor elétrico nacional, de sorte que, sob esse aspecto, não existe uma tecnologia devidamente estabelecida e comprovada para produção do mesmo. Trata-se, pois, de um campo da ciência livre para as especulações e as universidades brasileiras, dentre as quais a UFPE, têm investido em pesquisas nessa matéria sob os auspícios das concessionárias de energia elétrica. É relevante registrar que num passado recente, a GEC, empresa criadora do RNS, fabricou muitas unidades desse dispositivo, algumas das quais destinadas a limitadores da corrente de curto-circuito como o ARMTRS, todavia a tecnologia dos mesmos jamais foi revelada por completo.

As investigações desenvolvidas na UFPE mostram que a tecnologia empregada para a fabricação de transformadores presta-se perfeitamente para os RNS's, desde que ajustadas para satisfazer as peculiaridades desse último. É comum nos transformadores trifásicos o uso de estruturas eletromagnéticas em monobloco para constituição do núcleo, sendo as configurações mostradas na Figura 3.4 as mais notáveis.



**Figura 3.4** – Estruturas eletromagnéticas em monoblocos.

Tais estruturas são adequadas quando as três fases do dispositivo operam em condições equilibradas de carga, como ocorre nos transformadores. No ARMTRS, todavia, o RNS poderá ser solicitado a funcionar em regime de muita assimetria, como nos curtos-circuitos monofásicos e, nessas circunstâncias, a grande intensidade de fluxo produzido na fase defeituosa atingirá toda a estrutura magnética, levando a mesma ao regime de intensa saturação. Os reatores lineares das três fases serão, nesse caso, acionados para proceder a mitigação não apenas da corrente de falha, mas também da corrente de carga das fases sãs, o que caracteriza um funcionamento impróprio. Para evitar esse comportamento numa estrutura em monobloco, o jugo da mesma deverá ser dimensionado para funcionar fora do regime de saturação sob qualquer regime operativo, o que exigirá o emprego de uma secção exagerada de ferro. Essa particularidade do ARMTRS recomenda o uso de estruturas individuais para cada fase, cujas opções são apresentadas na Figura 3.5.

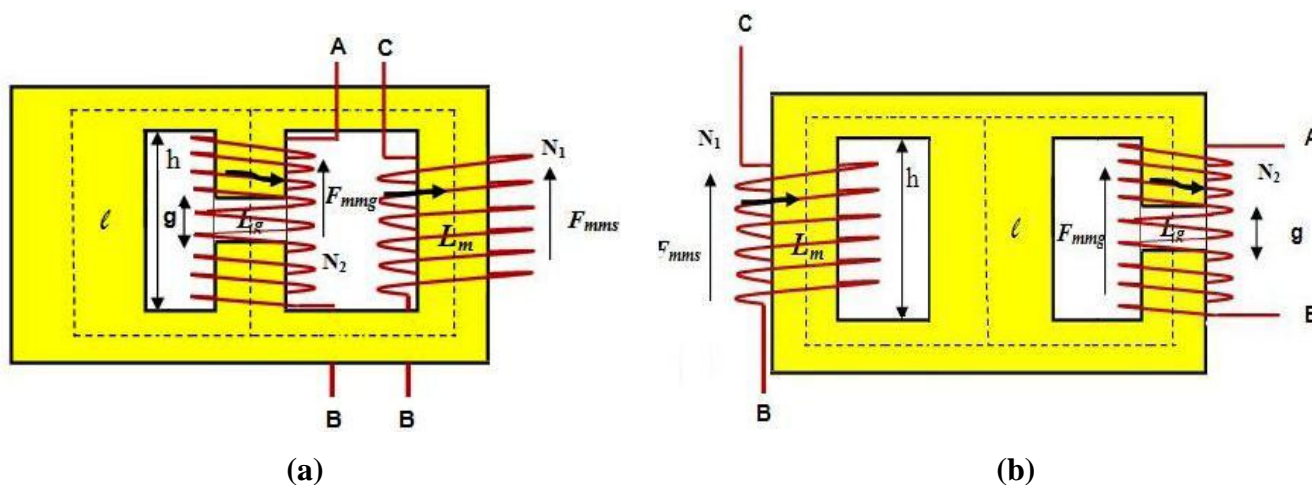


**Figura 3.5** – Estruturas eletromagnéticas individuais por fase.

No que tange à tecnologia dos materiais, o RNS poderá ser construído com qualquer tipo de aço, uma vez que em regime normal de operação o mesmo opera abaixo da indução de saturação e, portanto, as perdas nesse elemento se tornam de pequena monta.

As considerações expostas anteriormente apontam as dimensões e o peso do ARMTRS como elementos restritivos para a aplicação desse dispositivo nos moldes propostos, qual seja, instalados no alto de postes em plena via pública. Sob esse enfoque, a conjugação do RNS e de parte do RLS numa estrutura eletromagnética única parece, numa análise expedita, uma proposta atraente, pois se espera, nesse caso, uma redução dos parâmetros de interesse.

As investigações conduzidas no âmbito do LDSP com esse propósito indicaram as estruturas da Figura 3.6 como as mais promissoras. Nesse arranjo, a coluna central funciona como jugo comum tanto para o RNS como para o RLS, o que deverá, certamente, redundar numa estrutura com peso e dimensões inferiores àqueles da opção individual para cada um desses componentes.



**Figura 3.6** – (a) Modelo ferromagnético da Estrutura Assimétrica e (b) Modelo ferromagnético da Estrutura Simétrica.

A Estrutura Assimétrica conforme mostra a Figura 3.6 (a) é composta de uma bobina de núcleo saturado (RNS), uma bobina linear (RLS) e um retorno de forma que a bobina de núcleo linear esteja entre a bobina de núcleo saturado e o retorno.

Já a Estrutura Simétrica conforme mostra a Figura 3.6 (b) também é composta de uma bobina de núcleo saturado (RNS), uma bobina linear (RLS) e um retorno de forma que o retorno esteja entre a bobina de núcleo saturado e a bobina de núcleo linear.

É preciso ressaltar que em ambas as estruturas há a necessidade de a bobina linear está o mais próximo possível do retorno para que o fluxo gerado por ela circulasse pelo retorno e não pela bobina de núcleo saturado. Caso contrário, o fluxo da bobina linear iria contribuir para que a bobina de núcleo saturado entrasse em saturação mais rapidamente.

### 3.2 – Rotina de cálculo

Para a modelagem do ARMTRS deve-se proceder da seguinte forma:

- Determinar o ponto a ser alocado o ARMTRS. Deve-se escolher um ponto onde a tensão esteja abaixo dos níveis considerados adequados pela Resolução da ANEEL mostrado na Tabela 2.3;
- Determinar o quanto de capacitância líquida o sistema necessita para que a tensão se eleve a aproximadamente 1,0 pu na barra de carga mais distante do alimentador sem exceder 1,05 pu em nenhum outro trecho;
- Determinar o valor da reatância capacitiva e da reatância indutiva do reator linear para que se tenha a capacitância líquida necessária conforme foi definido no passo anterior.
- Dimensionar o reator saturado de modo que a tensão de saturação seja maior que a queda de tensão nos seus terminais em regime permanente.
- Depois de escolhido a reatância do reator linear, deve-se determinar a parcela necessária de reatância indutiva (ver Figura 3.1) para limitar a corrente de curto-circuito;
- Certificar-se que as características nominais do BCS em regime permanente não sejam violadas; já em regime transitório deve-se proceder de acordo com as normas e/ou seguir as recomendações dos fabricantes para que os BCS suportem as sobretensões e sobrecorrentes. Deve-se sempre optar pela segurança do sistema usando mais células capacitivas do que o número mínimo necessário, assim se alguma célula vier a se danificar, poderá ser trocada sem sobrecarregar o BCS;
- Certifica-se que todas as funções do ARMTRS forma atendidas: regulação de tensão, limitação da corrente de curto-circuito, controle do afundamento e elevação da tensão.

Os parâmetros desse alimentador, SLM – 01C3, para o dimensionamento dos componentes do ARMTRS estão mostrados na Tabela 3.1.

**Tabela 3.1 – Alimentador – SLM - 01C3.**

$S_{cc3\phi}$ (MVA)	<b>131,4</b>
$I_{Carga}$ (A <sub>RMS</sub> )	115,0
$I_{curto}$ na barra fim (A <sub>RMS</sub> )	537,0
Tensão no ponto de instalação do ARMTRS (pu)	0,92
Tensão na barra fim (pu)	0,90
$X_{cap.Líquida}$ ( $\Omega$ )	8,0
$X_{RLS}$ ( $\Omega$ )	3,5
$X_{AR}$ ( $\Omega$ )	3,0
$X_{BCS}$ ( $\Omega$ )	14,4
Taxa de crescimento anual da carga (%)	5,36

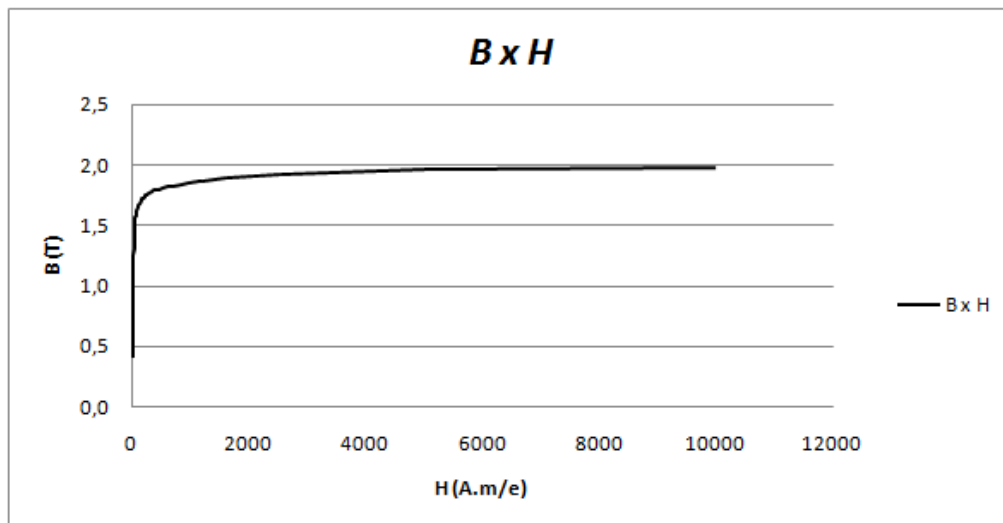
### 3.3 – Curva de magnetização

Na construção das estruturas ferromagnética do protótipo industrial ARMTRS será usada chapas de aço silicioso M125-27-E-004 grão orientado de 0,27 mm de espessura, cuja curva de magnetização ( $B \times H$ ) desse aço é apresentada na Tabela 3.2 e na Figura 3.7.

**Tabela 3.2 – Curva de magnetização com 48 ponto.**

$B$ (T)	$H$ (A.m/e)	$B$ (T)	$H$ (A.m/e)
0,40	11,937	1,66	103,451
0,50	13,608	1,68	119,366
0,60	15,358	1,7	147,218
0,70	17,109	1,71	163,134
0,80	18,701	1,72	179,049
0,90	20,292	1,73	202,923
1,00	21,168	1,74	226,796
1,05	21,884	1,75	259,423
1,10	22,839	1,76	282,5
1,15	23,635	1,77	334,225
1,20	24,987	1,78	377,993
1,25	26,42	1,79	445,634
1,30	28,17	1,8	501,338
1,35	30,637	1,81	612,747
1,40	33,025	1,82	700,282
1,45	37,242	1,83	835,564
1,50	42,972	1,84	954,93
1,52	45,757	1,85	1114,085
1,54	48,94	1,86	1193,662
1,56	53,317	1,87	1392,606
1,58	58,887	1,88	1591,549
1,60	66,049	1,92	2500
1,62	76,394	1,96	5000
1,64	85,944	1,97	10000



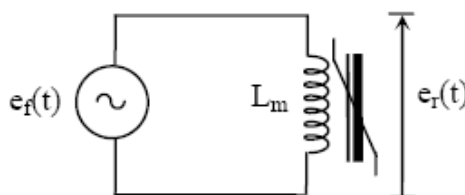


**Figura 3.7** – Curva de Magnetização ( $B \times H$ ) do aço M125-27-E004.

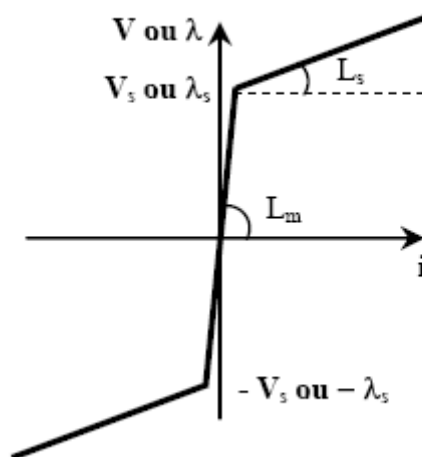
### 3.4 – Dimensionamento do Reator Naturalmente Saturado – RNS

Segundo [8] o circuito apresentado na Figura 3.8 composto por um único indutor recebendo alimentação de uma fonte de tensão senoidal desprezando-se a resistência ôhmica do enrolamento e considerando-se uma característica de magnetização idealizada para o mesmo, tal qual aquela da Figura 3.9, o funcionamento desse circuito será orientado pela seguinte regra:

- Enquanto a tensão da fonte não ultrapassar o valor estabelecido para a saturação do núcleo, nenhuma corrente fluirá no circuito;
- Quando, por outro lado, a saturação for alcançada, a resposta do circuito será aquela de uma indutância pura,  $L_m$ , como determina a sua característica de magnetização.



**Figura 3.8** – Circuito com um único núcleo.



**Figura 3.9** – Característica de magnetização.

Para o dimensionamento do RNS inicialmente estimou-se a área efetiva de ferro necessária em mm<sup>2</sup>, a indução inicial de saturação em Tesla (T) e a tensão de saturação em V<sub>RMS</sub>.

Para onda senoidais, o fluxo magnético é dado por

$$\phi = \phi_{m\acute{a}x} \cdot \sin \omega t \quad (3.1)$$

E de acordo com a Lei de Faraday, tem-se que

$$e = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (3.2)$$

Substituindo a expressão 3.1 na expressão 3.2, resulta em

$$e = -N\omega\phi_{m\acute{a}x} \cos \omega t \quad (3.3)$$

Onde,

$$\omega = 2\pi f \quad (3.4)$$

Substituindo 3.4 em 3.3, tem-se

$$e = -2\pi f N \phi_{m\acute{a}x} \cos \omega t \quad (3.5)$$

O valor em RMS para expressão 3.5 é dado por

$$E_p = \frac{2\pi f}{\sqrt{2}} N \phi_{m\acute{a}x} \cos \omega t \quad (3.6)$$

De acordo com a lei de Gauss, a densidade de fluxo magnético é uniforme em uma seção reta de um circuito magnético e dada pela seguinte expressão:

$$\phi = B \cdot A \quad (3.7)$$

Substituindo 3.7 em 3.6, tem-se que

$$E_p = 4,44 f N B A \cos \omega t \quad (3.8)$$

Onde o número de espira é determinado por

$$N = \frac{V_{RMS}}{4,44 \cdot B f A} \quad (3.9)$$

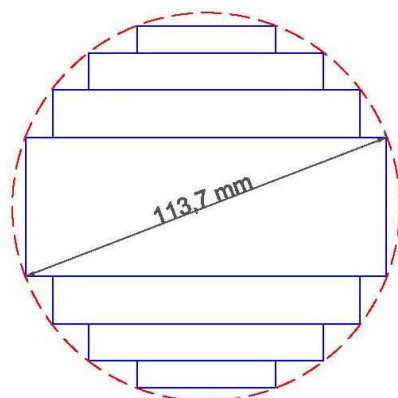
Conforme [9] a seção geométrica do núcleo do RNS foi estimada da seguinte forma:

$$A_{g_{RNS}} = 9000 \text{ mm}^2 \quad (3.10)$$

Porém, está seção não representa a seção verdadeira de ferro, ou seja, a seção magnética, pois entre uma lâmina e outra existe uma espessura de material isolante. Assim sendo, a seção magnética é obtida multiplicando a seção geométrica pelo fator de empilhamento ( $f_e$ ). Logo, a seção magnética é dada por:

$$A_{m_{RNS}} = 9000 \cdot 0,96 = 8640 \text{ mm}^2 \quad (3.11)$$

No dimensionamento do núcleo do RNS em relação ao número de steps [10] foram usado 4 (quatro) steps, ou seja, o núcleo representa uma seção circular com diâmetro de aproximadamente 114 mm conforme pode ser visto na Figura 3.10.



**Figura 3.10** – Seção transversal do núcleo do RNS com quatro step.

O diâmetro é determinado a partir da seção geométrica do núcleo e do fator de utilização do ferro ( $f_{uf}$ ), ver Tabela 3.3, a fração de área do círculo ocupada pelo ferro é dada por

$$A_{g_{RNS}} = f_{uf} \cdot A_{c_{RNS}} \quad (3.12)$$

Onde,

$$A_{c_{RNS}} = 9000 / 0,886 = 10158,01 \text{ mm}^2 \quad (3.13)$$

Logo, o diâmetro é dado por

$$D_{RNS} = \sqrt{\frac{4 \cdot A_{c_{RNS}}}{\pi}} \quad (3.14)$$

O que resulta em

$$D_{RNS} = \sqrt{\frac{4 \cdot 10158,01}{\pi}} = 113,72 \text{ mm} \quad (3.15)$$

**Tabela 3.3 - Fatores de Forma para Seção Circular e números de steps.**

<b>Fatores de Forma para Seção Circular</b>											
<b>Nº Steps</b>	<b>Fração da área Circulo Ocupada pelo Ferro</b>	<b>Normalização X Coordenadas</b>									
		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
<b>1</b>	0,6366	0,7071									
<b>2</b>	0,7869	0,5257	0,851								
<b>3</b>	0,851	0,424	0,707	0,91							
<b>4</b>	0,886	0,3591	0,606	0,8	0,93						
<b>5</b>	0,9079	0,3138	0,534	0,71	0,85	0,95					
<b>6</b>	0,9228	0,2802	0,479	0,64	0,77	0,88	0,96				
<b>7</b>	0,9337	0,2543	0,435	0,58	0,71	0,81	0,9	0,9671			
<b>8</b>	0,9419	0,2335	0,401	0,54	0,65	0,76	0,843	0,9163	0,97		
<b>9</b>	0,9483	0,2164	0,372	0,5	0,61	0,71	0,792	0,8661	0,93	0,98	
<b>10</b>	0,9534	0,2021	0,348	0,47	0,57	0,66	0,747	0,8199	0,88	0,94	0,979

Além da área efetiva de ferro (3.10), foram estimados a tensão de saturação de 2,9kV<sub>PICO</sub> e a indução magnética de 1,8 T e substituindo os parâmetros estimados na expressão 3.9 , tem-se que o número de espiras para o RNS é de aproximadamente

$$N = \frac{2900/\sqrt{2}}{4,44 \cdot 1,8 \cdot 60 \cdot 8640 \cdot 10^{-6}} = 495 \text{ espiras} \quad (3.16)$$

A curva de magnetização do núcleo naturalmente saturado foi obtida através da curva  $B \times H$  do ferro, ver Tabela 3.2 e Figura 3.7, e dos parâmetros inicialmente estimados e ajustados de modo a obter as características magnéticas desejadas.

O fluxo concatenado é dado pela seguinte expressão:

$$\lambda = \phi \cdot N \quad (3.17)$$

Substituindo a expressão 3.7 em 3.17, tem-se que,

$$\lambda = B \cdot A \cdot N \quad (3.18)$$

A tensão é dada por:

$$V = \omega \cdot \lambda \quad (3.19)$$

Assim a equação 3.19 pode ser escrita da seguinte forma:

$$V = 2\pi f \cdot B \cdot A \cdot N \quad (3.20)$$

A corrente é dada pela lei de Ampère:

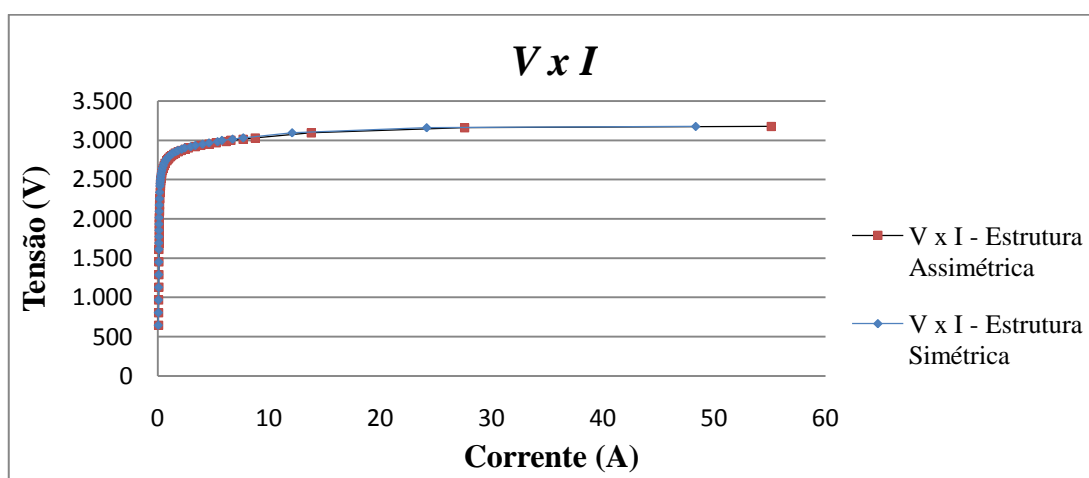
$$Hl = Ni \quad (3.21)$$

De modo que pode ser calculada pela seguinte expressão:

$$i = \frac{Hl}{N} \quad (3.22)$$

Onde  $H$  e  $l$  são o campo e caminho magnético, respectivamente.

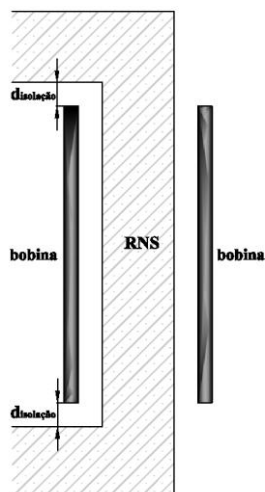
A Figura 3.11 mostra a curva  $V \times I$  obtida para a bobina de núcleo saturado das Estruturas Assimétrica e Simétrica.



**Figura 3.11** – Curva  $V \times I$  para a Estrutura Assimétrica e Simétrica.

### 3.4.1 – Dimensionamento do condutor para o Reator Naturalmente Saturado – RNS

Foi usado um condutor retangular de seção 24,14 mm<sup>2</sup>, 5 mm de espessura e 5 mm de largura. A altura da janela foi estimada em 900 mm e as espiras dispostas em três camadas respeitando a distância de isolamento de 13 mm [11] como pode ser visto na Figura 3.12.



**Figura 3.12 – Bobina do RNS.**

As resistências das bobinas são calculadas da seguinte forma:

$$R_{Bobina} = \frac{\rho \cdot l_{cobre}}{A_{cobre}} \quad (3.23)$$

Onde,

$l_{cobre}$  é o comprimento de cobre;

$A_{cobre}$  é a área da seção de cobre;

$\rho$  é a resistividade do cobre.

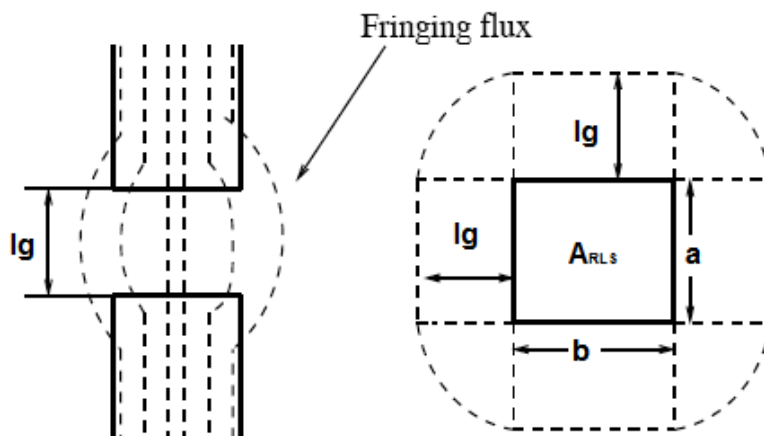
Para a bobina de núcleo saturado tem-se:

$$R_{Bob \ RNS} = \frac{1,72 \cdot 10^{-8} \cdot 183,3}{24,14 \cdot 10^{-6}} \cong 0,13 \ \Omega \quad (3.24)$$

### 3.5- Dimensionamento do Reator Linear Série - RLS - Estrutura ferromagnética

Para o dimensionamento do RLS também se estima a área efetiva de ferro necessária em  $\text{mm}^2$ , a reatância em ohms  $[\Omega]$  e a corrente de carga em Ampère  $[A]$  ao qual será submetido o reator linear.

De acordo com [12] o fluxo magnético sofre um fenômeno chamado de espraiamento (*Fringing Flux*) ao cruzar o entreferro (Gap), conforme pode ser visto na Figura 3.13. Isto faz com que a área geométrica do entreferro por onde passa o fluxo seja maior que a área geométrica do ferro.



**Figura 3.13** – Fenômeno de espraiamento (*Fringing Flux*).

Considerando o fenômeno de espraiamento, a área geométrica do RLS é dada por:

$$A_{gRLS} = (a + l_g) \cdot (b + l_g) \quad (3.25)$$

Onde,

$l_g$  é altura do gap (entreferro);

$a$  é a largura do núcleo do RLS;

$b$  é o comprimento do núcleo do RLS.



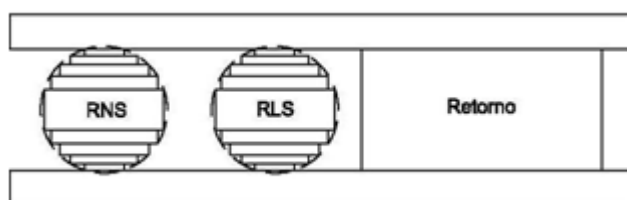
Conforme [9] a seção geométrica do núcleo do RLS foi estimada da seguinte forma:

$$A_{gRNS} = 9000 \text{ mm}^2 \quad (3.26)$$

Porém, esta seção não representa a seção verdadeira de ferro, ou seja, a seção magnética, pois entre uma lâmina e outra existe uma espessura de material isolante. Assim sendo, a seção magnética é obtida multiplicando a seção geométrica pelo fator de empilhamento ( $f_e$ ). Logo, a seção magnética é dada por:

$$A_{mRNS} = 9000 \cdot 0,96 = 8640 \text{ mm}^2 \quad (3.27)$$

O RLS foi dimensionado com uma seção circular com a mesma área e número de steps do RNS para que a estrutura fosse construtivamente viável, visto que não são estruturas independentes, como pode ser observado na Figura 3.14.



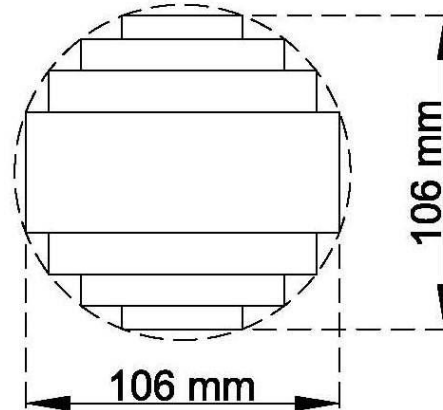
**Figura 3.14** – Vista superior do ARMTRS – RLS com a mesma área do RNS.

A altura do gap é calculada de modo que a menor dimensão da área da seção reta do núcleo do RLS não seja menor que o quádruplo do comprimento do entreferro [12]. Ou seja,

$$g < \frac{1}{k_f} \cdot l_{Menor} \quad (3.28)$$

Conforme a Figura 3.15 tanto a profundidade quanto o comprimento possuem o mesmo valor, portanto não há distinção em qual lado será usado como referência. Usando um fator  $k_f$  de 8,5, tem-se que a altura do gap é dada por:

$$g < \frac{1}{8,5} \cdot 106 \Rightarrow g < 12,5 \text{ mm} \quad (3.29)$$



**Figura 3.15** – Seção circular do RLS com 4 steps.

O *Fringing Flux* foi modelado conforme [13], este modelo foi escolhido devido a sua simplicidade e precisão estável e é dado por:

$$F_{flux} = 1 + \frac{l_g}{\sqrt{A_{RLS}}} \cdot \ln \frac{2G}{l_g} \quad (3.30)$$

Onde G é a altura do núcleo.

Substituindo os parâmetros do RLS na expressão 3.30 e, tem-se que

$$F_{flux} = 1 + \frac{12,5 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{9000 \cdot 0,96 \cdot 10^{-6}}} \cdot \ln \frac{2(900 \cdot 10^{-3})}{12,5 \cdot 10^{-3}} = 1,67 \quad (3.31)$$

Conforme [14] a relutância é dada por:

$$\mathfrak{R} = \frac{l_m + l_g \cdot \mu_r}{\mu_r \mu_0 \cdot A_{RLS}} \quad (3.32)$$

Onde,

$l_m$  é o caminho médio magnético;

$\mu_r$  é a permeabilidade relativa do meio;

$\mu_0$  é a permeabilidade do ar;

E a indutância do RLS é dada por:

$$L = \frac{N^2}{\mathcal{R}} \quad (3.33)$$

Substituindo (3.32) em (3.33), tem-se que a indutância do RLS é dada por:

$$L = N^2 \frac{\mu_r \cdot \mu_0 \cdot A_{RLS}}{l_m + l_g \cdot \mu_r} \quad (3.34)$$

Considerando o *Fringing Flux* a expressão (3.34) torna-se igual a:

$$L_c = F_{flux} \cdot N^2 \frac{\mu_r \cdot \mu_0 \cdot A_{RLS}}{l_m + l_g \cdot \mu_r} \quad (3.35)$$

Logo, o número de espirada é dado por:

$$N = \sqrt{\frac{L_c(l_m + l_g \mu_r)}{F_{flux} \cdot \mu_r \cdot \mu_0 A_{RLS}}} \quad (3.36)$$

A reatância necessária para o RLS é de 3,5  $\Omega$ , o que resulta numa indutância de aproximadamente 9,3 mH e considerando que o caminho magnético ( $l_m$ ) seja de 2392,7 mm e a permeabilidade relativa do meio igual a 9189,21. Logo, o número de espiras necessárias para o RLS é de

$$N = \sqrt{\frac{9,3 \cdot 10^{-3}(2392,7 \cdot 10^{-3} + 12,5 \cdot 10^{-3} \cdot 9189,21)}{1,67 \cdot 9189,21 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 9000 \cdot 0,96 \cdot 10^{-6}}} \cong 81 \text{ espiras} \quad (3.37)$$

E a indução do gap é dada por:

$$B_{Gap} = \frac{\mu_0 \cdot Ni}{l_g} \quad (3.38)$$

Considerando uma corrente de carga igual a  $165,7A_{RMS}$ , tem-se que a indução magnética do gap é de

$$B_{Gap} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 81 \cdot 165,7}{12,5 \cdot 10^{-3}} \cong 1,35 T \quad (3.39)$$

É preciso salientar que o RLS foi dimensionado com a corrente de carga prevista para o oitavo ano como pode ser visto na Tabela 2.6, esse critério é importante para que a indução no RLS não se eleve muito se caso fosse dimensionado com a corrente de carga do primeiro ano. A Tabela 3.4 mostra a indução no RLS para cada ano.

**Tabela 3.4 – Indução no RLS ao longo dos anos.**

<i>Ano</i>	<i>B<sub>RLS</sub> (T)</i>
<b>1</b>	0,94
<b>2</b>	0,99
<b>3</b>	1,04
<b>4</b>	1,10
<b>5</b>	1,16
<b>6</b>	1,22
<b>7</b>	1,28
<b>8</b>	1,35

### **3.5.1 – Dimensionamento do condutor para o Reator Linear Série – RLS – Estrutura ferromagnética**

Foi estimada uma densidade de corrente média em torno de  $2,5 A/mm^2$  para uma corrente de carga em torno de  $165,7A_{RMS}$ . Para esses dados seria necessário usar um fio de cobre com uma seção de  $55,23 mm^2$ . Conforme mostra a equação 3.40,

$$S = \frac{I}{d} = \frac{165,7}{2,5} = 66,28 \text{ mm}^2 \quad (3.40)$$

No entanto o fio escolhido tem uma seção retangular de 58,60 mm<sup>2</sup> com espessura de 6,54 mm e largura de 9,27 mm. Com essa seção obteve-se uma densidade real de corrente de 2,8 A/mm<sup>2</sup> em regime permanente conforme pode ser visto em 3.41.

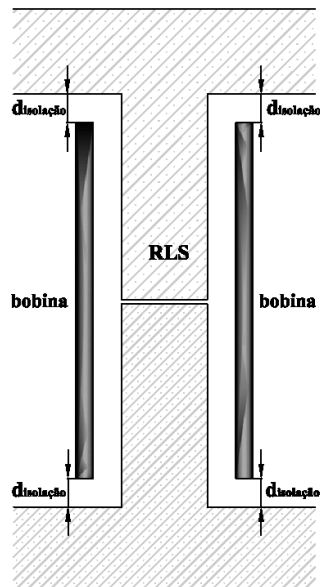
$$d_{real} = \frac{I}{S_{real}} = \frac{165,7}{58,60} = 2,8 \text{ A/mm}^2 \quad (3.41)$$

A Tabela 3.5 mostra a densidade de corrente para o RLS ao longo dos anos.

**Tabela 3.5** – Densidade de corrente no RLS ao longo dos anos.

<i>Ano</i>	<i>d<sub>real</sub> (A/mm<sup>2</sup>)</i>
<b>1</b>	2,0
<b>2</b>	2,1
<b>3</b>	2,2
<b>4</b>	2,3
<b>5</b>	2,4
<b>6</b>	2,5
<b>7</b>	2,7
<b>8</b>	2,8

A altura da janela foi estimada em 900 mm e as espiras disposta em uma única camada respeitando as distancia de isolamento [11] como pode ser visto na Figura 3.16.



**Figura 3.16 - Bobina do RLS.**

As resistências das bobinas são calculadas conforme a expressão 3.23. Para a bobina de núcleo linear tem-se:

$$R_{Bob\ RNS} = \frac{1,72 \cdot 10^{-8} \cdot 28,9}{58,60 \cdot 10^{-6}} \cong 0,01 \quad (3.42)$$

### 3.6- Dimensionamento do Retorno

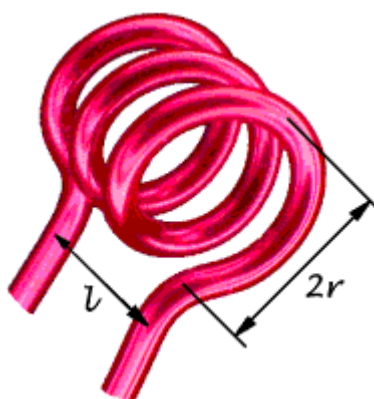
Para o dimensionamento do retorno estimou-se que a indução seria a metade da indução do reator saturado para que o mesmo não entrasse em saturação. Logo, a área geométrica do retorno é igual a:

$$A_{g\ Retorno} = \frac{B_{RNS}}{B_{Retorno}} \cdot A_{g\ RNS} \quad (3.43)$$

$$A_{g\ Retorno} = \frac{1,8}{0,9} \cdot 9000 = 18000\ mm^2 \quad (3.44)$$

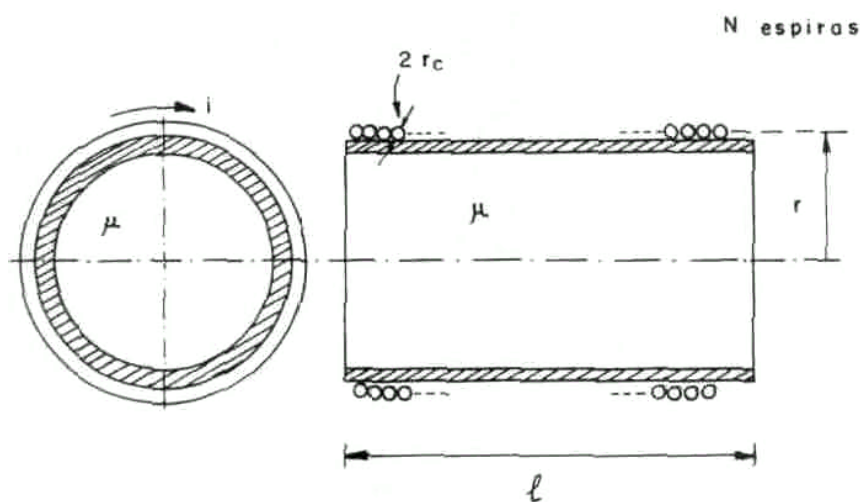
### 3.7- Dimensionamento do Reator Linear Série - RLS - Núcleo de Ar - Limitador de corrente de curto

Para o dimensionamento do RLS no ar estima-se a reatância necessária em ohms [ $\Omega$ ], o raio e a altura da bobina em milímetros [mm] e a corrente de carga em Ampère [A] à qual será submetido a bobina de núcleo de ar. A Figura 3.17 mostra um layout de uma bobina de núcleo de ar.



**Figura 3.17** – Layout de uma bobina de núcleo de ar.

Segundo [15] o cálculo da indutância de uma bobina de camada única é baseado em enrolamento concentrado, sobre uma forma cilíndrica em meio homogêneo como é observado na Figura 3.18.



**Figura 3.18** – Bobina de camada única com forma cilíndrica.

A indutância é calculada pela fórmula de Nagaoka e é dada pela expressão 3.45.

$$L = \frac{\mu_0 \pi a^2 N^2 K}{b} \quad (3.45)$$

Para o número de espiras, tem-se que

$$N = \sqrt{\frac{L \cdot b}{\mu_0 \pi a^2 K}} \quad (3.46)$$

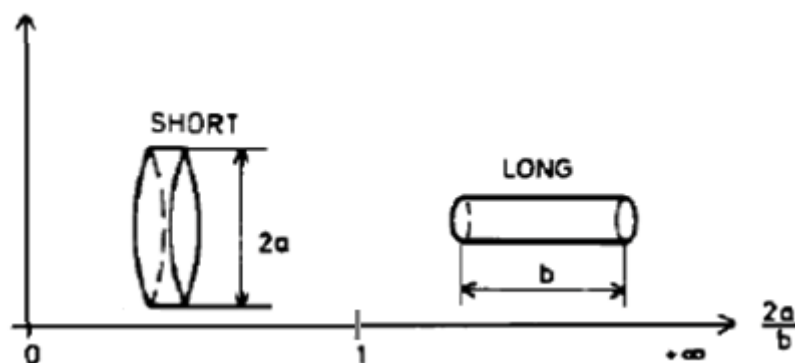
Onde,

a é o raio da bobina;

b é a altura da bobina;

K é o fator de forma de Nagaoka.

As bobinas de ar podem ser curtas ou longas como mostra a Figura 3.19.



**Figura 3.19** – Bobina Longa e Curta.

### 3.7.1 – Cálculos das Bobinas Curtas

Para o cálculo das bobinas curtas a relação entre a altura e o diâmetro é dada por:

$$\alpha = \frac{b}{2a} < 1 \quad (3.47)$$



O que resulta em,

$$b < 2a \quad (3.48)$$

De acordo com [15] o fator K da equação 3.46 é dado pela Tabela 3.6.

**Tabela 3.6 – Valor de K para bobinas curta.**

Bobina Curta									
b/2a	K	b/2a	K	b/2a	K	b/2a	K	b/2a	K
0,00	0,0000000	0,21	0,3294790	0,42	0,4834960	0,63	0,581462	0,84	0,649358
0,01	0,0349600	0,22	0,3388520	0,43	0,4891290	0,64	0,585252	0,85	0,65207
0,02	0,0610980	0,23	0,3479600	0,44	0,4946460	0,65	0,588976	0,86	0,654743
0,03	0,0839070	0,24	0,3568160	0,45	0,5000520	0,66	0,592638	0,87	0,657376
0,04	0,1045620	0,25	0,3654320	0,46	0,5053480	0,67	0,596239	0,88	0,659972
0,05	0,1236150	0,26	0,3738180	0,47	0,5105390	0,68	0,59978	0,89	0,662532
0,06	0,1413950	0,27	0,3819860	0,48	0,5156280	0,69	0,603263	0,90	0,665054
0,07	0,1581190	0,28	0,3899440	0,49	0,5206170	0,70	0,606689	0,91	0,66754
0,08	0,1739420	0,29	0,3977030	0,50	0,5255100	0,71	0,61006	0,92	0,669991
0,09	0,1889800	0,30	0,4052690	0,51	0,53031	0,72	0,613376	0,93	0,672408
0,10	0,2033240	0,31	0,4126500	0,52	0,535018	0,73	0,616639	0,94	0,674792
0,11	0,2170440	0,32	0,4198560	0,53	0,539637	0,74	0,61985	0,95	0,677142
0,12	0,2302000	0,33	0,4268900	0,54	0,54417	0,75	0,623011	0,96	0,67946
0,13	0,2428420	0,34	0,4337620	0,55	0,54862	0,76	0,626122	0,97	0,681747
0,14	0,2550110	0,35	0,4404740	0,56	0,552988	0,77	0,629185	0,98	0,684003
0,15	0,2667440	0,36	0,4470360	0,57	0,557278	0,78	0,6322	0,99	0,686228
0,16	0,2780700	0,37	0,4534500	0,58	0,561491	0,79	0,63517	1,00	0,688423
0,17	0,2890190	0,38	0,4597240	0,59	0,565628	0,80	0,638094		
0,18	0,2996140	0,39	0,4658600	0,60	0,569691	0,81	0,640974		
0,19	0,3098760	0,40	0,4718650	0,61	0,573683	0,82	0,643811		
0,20	0,3198250	0,41	0,4777420	0,62	0,577606	0,83	0,646605		

No projeto do reator linear de núcleo de ar que compõem o ARMTRS a reatância indutiva necessária para limitar a corrente de curto-circuito é de  $3\Omega$ . Para o dimensionamento dessa reatância, estimou-se que o raio e a altura necessária para satisfazer a equação 3.48, é de 750 mm e 360 mm, respectivamente. Substituindo esses valores em 3.47, tem-se que

$$\alpha = \frac{350}{2 \cdot 700} = 0,25 < 1 \quad (3.49)$$

Logo, o fator de forma de Nagaoka segundo a Tabela 3.6 é dado por

$$K = 0,356816 \quad (3.50)$$

Então o número de espiras necessárias para o RLS no ar é de

$$N = \sqrt{\frac{(3/2\pi \cdot 60) \cdot 360 \cdot 10^{-3}}{4\pi 10^{-7} \pi \cdot (750 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 0,356816}} \cong 61 \quad (3.51)$$

O condutor foi dimensionado da mesma forma que o reator linear ferromagnético como mostrado na seção 3.5.1, usou-se um condutor com seção retangular de 34,66 mm<sup>2</sup> e com espessura e largura de 6 mm. Para um total de 61 espiras e espessura de 6 mm a altura real da bobina é dada por

$$b_{Real} = \text{espiras} \times \text{espessura} = 61 \times 6 = 366 \text{ mm} \quad (3.52)$$

Substituindo a altura real da bobina na equação 3.45, tem-se que a reatância real é de

$$X_{Real} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \pi \cdot (750 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 61^2 \cdot 0,356816}{366 \cdot 10^{-3}} \cdot 2\pi \cdot 60 = 3,03 \Omega \quad (3.53)$$

### 3.7.2 - Cálculos das Bobinas Longas

Para o cálculo das bobinas longas a relação entre a altura e o diâmetro é dada por:

$$\alpha = \frac{b}{2a} > 1 \quad (3.54)$$

O que resulta em,

$$b > 2a \quad (3.55)$$

De acordo com [15] o fator K da equação 3.46 é dado pela Tabela 3.7.

**Tabela 3.7 - Valor de K para bobinas longas.**

Bobina Longa									
2a/b	K	2a/b	K	2a/b	K	2a/b	K	2a/b	K
0,00	1,0000000	0,21	0,9163560	0,42	0,8433350	0,63	0,780032	0,84	0,72524
0,01	0,9957690	0,22	0,9126430	0,43	0,8401100	0,64	0,77724	0,85	0,722821
0,02	0,9915620	0,23	0,9089540	0,44	0,8369060	0,65	0,774467	0,86	0,720419
0,03	0,9873810	0,24	0,9052900	0,45	0,8337230	0,66	0,77173	0,87	0,718033
0,04	0,9832240	0,25	0,901649	0,46	0,8305630	0,67	0,768978	0,88	0,715663
0,05	0,9790920	0,26	0,8980330	0,47	0,8274240	0,68	0,766262	0,89	0,713308
0,06	0,9749850	0,27	0,8944400	0,48	0,8243070	0,69	0,763565	0,90	0,710969
0,07	0,9709030	0,28	0,8908710	0,49	0,8212110	0,70	0,760886	0,91	0,708647
0,08	0,9668470	0,29	0,8873250	0,50	0,8181360	0,71	0,758225	0,92	0,706339
0,09	0,9628150	0,30	0,8838030	0,51	0,815082	0,72	0,755582	0,93	0,704047
0,10	0,9588070	0,31	0,8803050	0,52	0,812049	0,73	0,752958	0,94	0,70177
0,11	0,9548250	0,32	0,8768290	0,53	0,809037	0,74	0,750351	0,95	0,699509
0,12	0,9508680	0,33	0,8733770	0,54	0,806046	0,75	0,747762	0,96	0,697262
0,13	0,9469350	0,34	0,8699480	0,55	0,803075	0,76	0,745191	0,97	0,69503
0,14	0,9430250	0,35	0,8665420	0,56	0,800125	0,77	0,742637	0,98	0,692813
0,15	0,9391410	0,36	0,8631580	0,57	0,797195	0,78	0,7401	0,99	0,690611
0,16	0,9352840	0,37	0,8597990	0,58	0,794285	0,79	0,737581	1,00	0,688423
0,17	0,9314500	0,38	0,8564610	0,59	0,791395	0,80	0,735079		
0,18	0,9276390	0,39	0,8531460	0,60	0,788525	0,81	0,732593		
0,19	0,9238540	0,40	0,8498530	0,61	0,785675	0,82	0,730126		
0,20	0,9200930	0,41	0,8465830	0,62	0,782844	0,83	0,727675		

No projeto do reator linear no ar que compõem o ARMTRS a reatância indutiva necessária para limitar a corrente de curto-circuito é de 3  $\Omega$ . Para o dimensionamento dessa reatância, estimou-se que o raio e a altura necessária para satisfazer a equação 3.54, é de 350 mm e 800 mm, respectivamente. Substituindo esses valores em 3.54, tem-se que

$$\alpha = \frac{800}{2 \cdot 260} = 1,54 > 1 \quad (3.56)$$

Invertendo 3.62, o K correspondente de acordo com a Tabela 3.7 é dado por

$$K = 0,718033 \quad (3.57)$$

Então o número de espiras necessárias para o RLS no ar é de

$$N = \sqrt{\frac{(3/2\pi \cdot 60) \cdot 800 \cdot 10^{-3}}{4\pi 10^{-7} \pi \cdot (350 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 0,718033}} \cong 136 \quad (3.58)$$

O condutor foi dimensionado da mesma forma que o reator linear ferromagnético como mostrado na seção 3.5.1, usou-se um condutor com seção retangular de 34,66 mm<sup>2</sup> e com espessura e largura de 6 mm. Para um total de 136 espiras e espessura de 6 mm a altura real da bobina é dada por

$$b_{Real} = \text{espiras} \times \text{espessura} = 136 \times 6 = 816 \text{ mm} \quad (3.59)$$

Substituindo a altura real da bobina na equação 3.45, tem-se que a reatância real é de

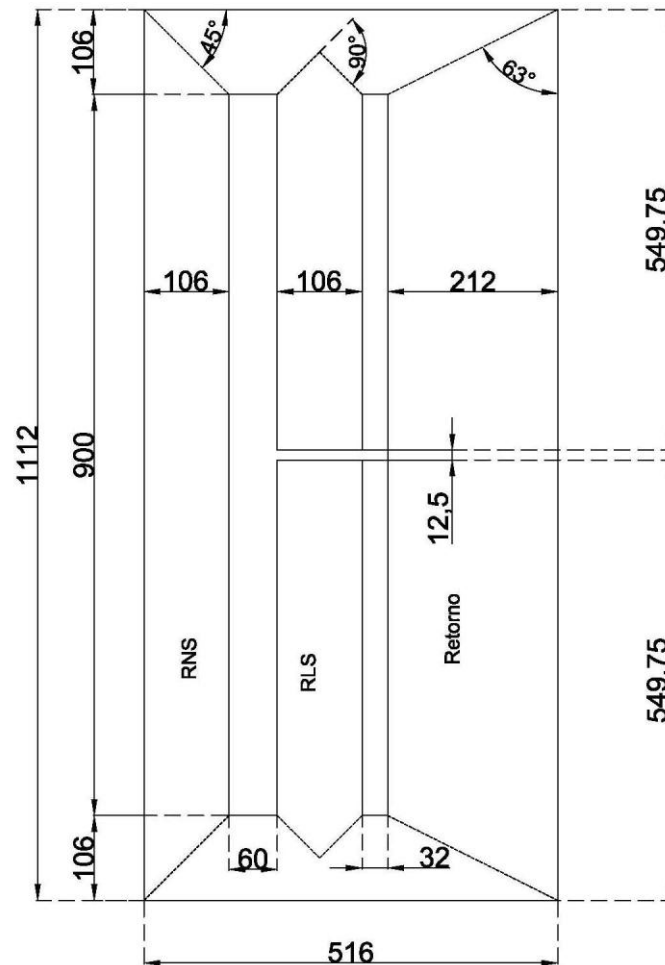
$$X_{Real} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \pi \cdot (350 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 136^2 \cdot 0,718033}{816 \cdot 10^{-3}} \cdot 2\pi \cdot 60 = 2,96 \Omega \quad (3.60)$$

### **3.8- Desenhos de projetos dos componentes do protótipo do ARMTRS 13,8kV – Cabeça de Série**

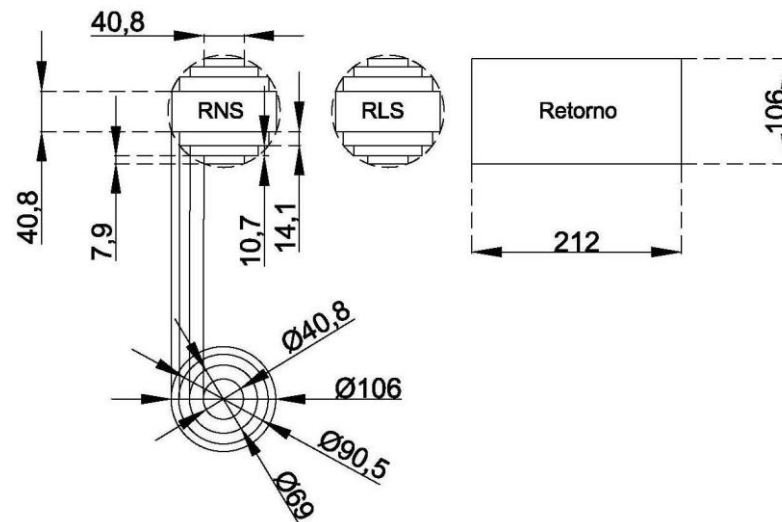
#### **3.8.1 - Dimensões Físicas - Alimentador SLM-01C3**

As Figuras 3.20, 3.21, 3.22 e 3.23 mostram o desenho com as dimensões físicas para confecção da estrutura ferromagnética composta pelo RNS e RLS, tanto para a Estrutura Assimétrica quanto para a Estrutura Simétrica. Nestes desenhos, a estrutura do núcleo é definida nos seus aspectos gerais, no que tange à distribuição das colunas e do retorno para formação do monobloco, como também nas formas construtivas escolhidas para esses componentes. Como assinala o desenho, as colunas RNS e RLS deverão exibir uma seção circular com diâmetro de 113,5 mm, enquanto o retorno deverá ser construído com seção retangular com comprimento de 212 mm. Todas as dimensões da estrutura ferromagnética do núcleo estão indicadas nesses desenhos, tais como a altura das colunas e as distâncias

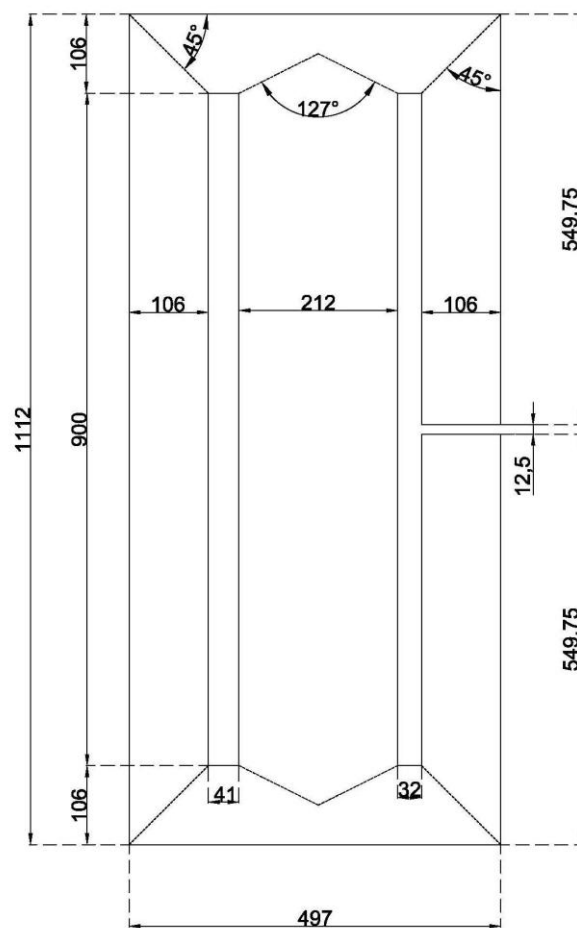
que deverão ser respeitadas entre as mesmas para acomodar satisfatoriamente os enrolamentos. O tipo de aço silicioso utilizado para a fabricação do protótipo do cabeça de série é o aço silicioso de grão orientado com 0,27 mm de espessura (M125-27-E-004). Uma estimativa da quantidade necessária desse material é de 384,9kg para cada núcleo monofásico, sendo estimado um total de 1154,8kg de aço para os três núcleos.



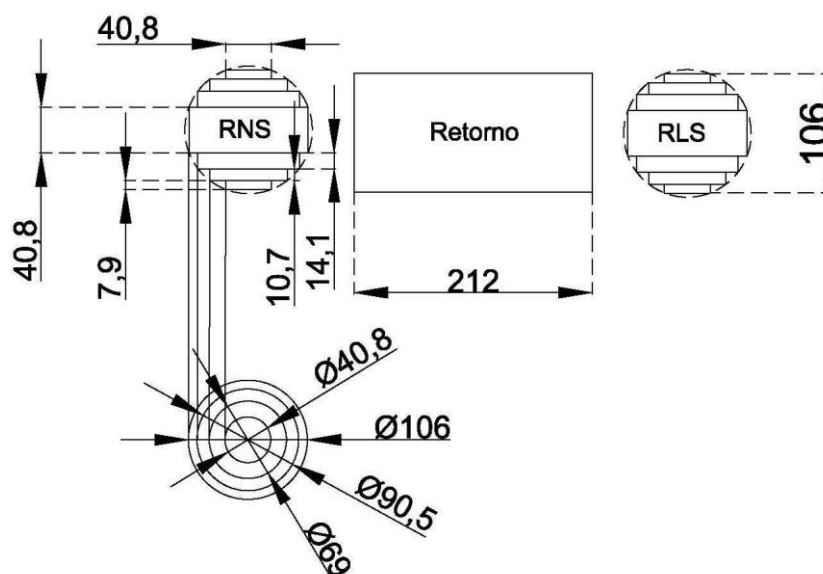
**Figura 3.20** – Dimensões físicas da estrutura ferromagnética Assimétrica (todas as unidades estão em milímetros) - SLM-01C3.



**Figura 3.21** – Dimensões físicas da estrutura ferromagnética Assimétrica – Vista Superior dos núcleos (todas as unidades estão em milímetros) - SLM-01C3.



**Figura 3.22** – Dimensões físicas da estrutura ferromagnética Simétrica (todas as unidades estão em milímetros) - SLM-01C3.



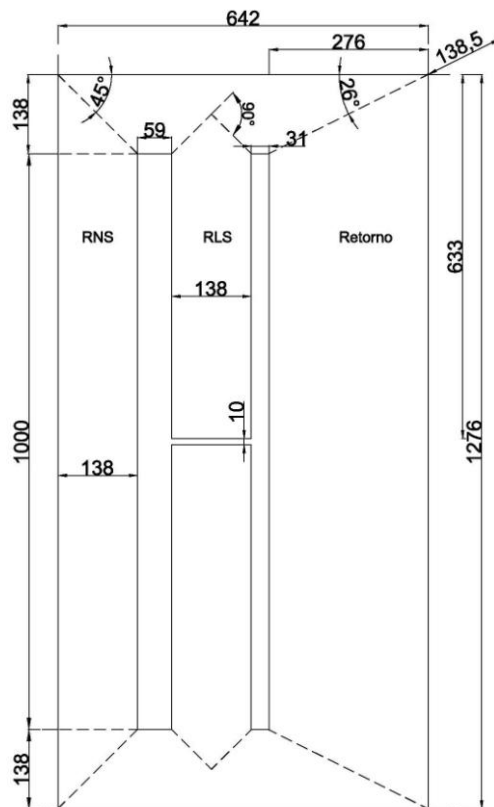
**Figura 3.23** – Dimensões físicas da estrutura ferromagnética Simétrica – Vista Superior dos núcleos (todas as unidades estão em milímetros) – SLM-01C3.

As Figuras 3.21 e 3.23 mostram as dimensões de corte das lâminas de aço para produzir uma secção circular para a coluna do reator naturalmente saturado e o reator linear série. A opção para isso foi a construção em 4 (quatro) degraus, sendo o primeiro degrau com um comprimento de 106 mm, o segundo degrau com 90,5 mm, o terceiro degrau com 69 mm e o quarto e último degrau com 40,8 mm. Os desenhos mencionados fornecem todas as dimensões em milímetros das chapas para a composição dessa secção circular.

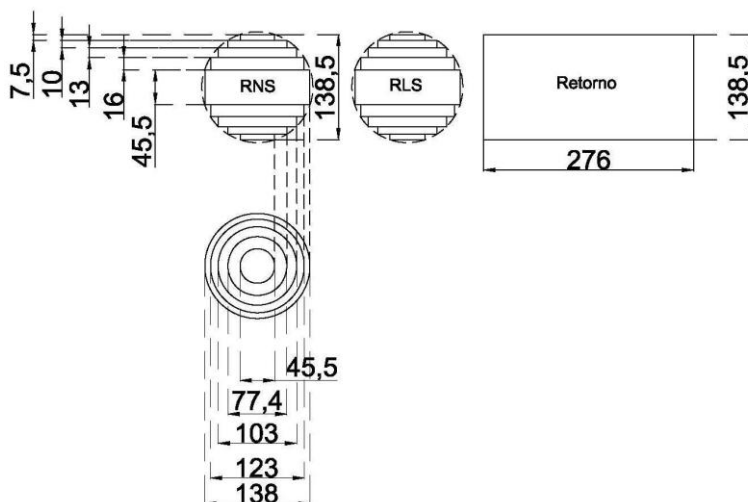
### 3.8.2 – Dimensões Físicas – Alimentador ITA-03

As Figuras 3.24, 3.25, 3.26 e 3.27 mostram o desenho com as dimensões físicas para confecção da estrutura ferromagnética composta pelo RNS e RLS, tanto para a Estrutura Assimétrica quanto para a Estrutura Simétrica. Nestes desenhos, a estrutura do núcleo é definida nos seus aspectos gerais, no que tange à distribuição das colunas e do retorno para formação do monobloco, como também nas formas construtivas escolhidas para esses componentes. Como assinala o desenho, as colunas do RNS e do RLS deverão exibir uma secção circular com diâmetro de 145,3 mm, enquanto o retorno deverá ser construído com secção retangular com comprimento de 276 mm. Todas as dimensões da estrutura ferromagnética do núcleo estão indicadas nesses desenhos, tais como a altura das colunas e as distâncias que deverão ser respeitadas entre as mesmas para acomodar satisfatoriamente

os enrolamentos. O tipo de aço silicioso utilizado para a fabricação do protótipo do cabeça de série é o aço silicioso de grão orientado com 0,27 mm de espessura (M125-27-E-004). Uma estimativa da quantidade necessária desse material é de 628,1kg para cada núcleo monofásico, sendo estimado um total de 1884,3kg de aço para os três núcleos.

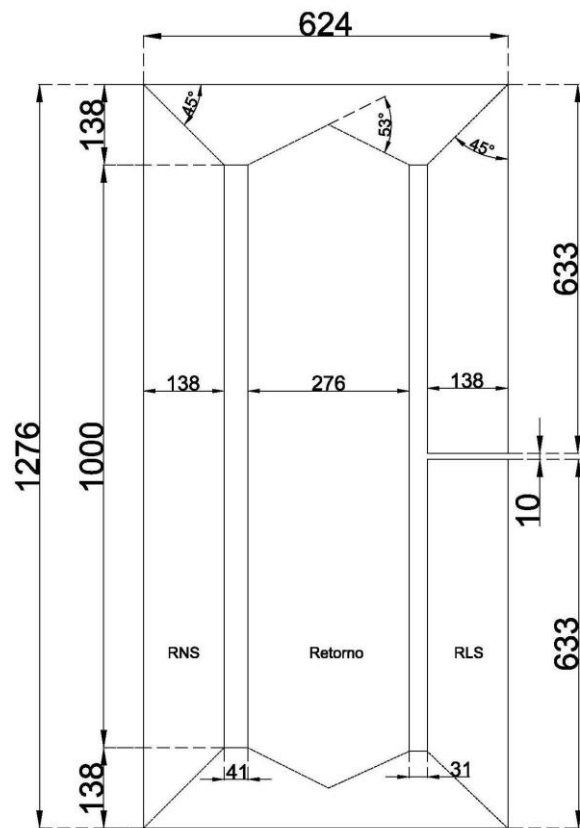


**Figura 3.24** – Dimensões físicas da estrutura ferromagnética Assimétrica (todas as unidades estão em milímetros) – ITA-03.

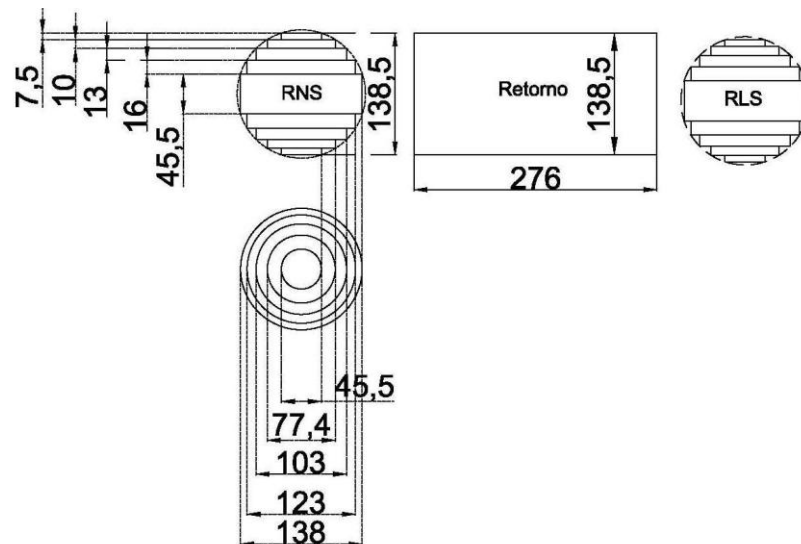


**Figura 3.25** – Dimensões físicas da estrutura ferromagnética Assimétrica – Vista Superior dos núcleos (todas as unidades estão em milímetros) – ITA-03.





**Figura 3.26** – Dimensões físicas da estrutura ferromagnética Simétrica (todas as unidades estão em milímetros) – ITA-03.



**Figura 3.27** – Dimensões físicas da estrutura ferromagnética Simétrica – Vista Superior dos núcleos (todas as unidades estão em milímetros) – ITA-03.

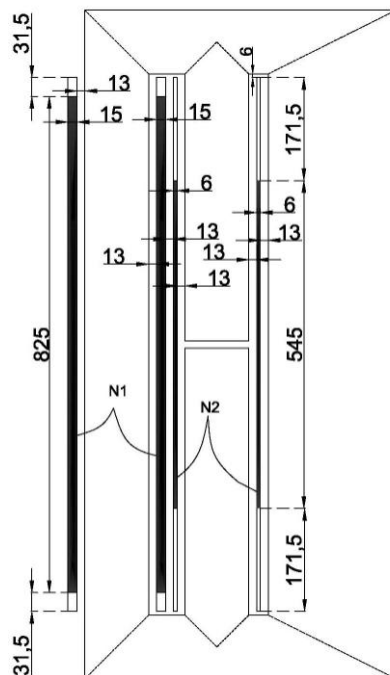
As Figuras 3.25 e 3.27 mostram as dimensões de corte das lâminas de aço para produzir uma secção circular para a coluna do reator naturalmente saturado e o reator linear série. A opção para isso foi a construção em 5 (cinco) degraus, sendo o primeiro degrau com um comprimento de 138 mm, o segundo degrau com 123 mm, o terceiro degrau com 103 mm, o quarto degrau com 77,4 mm e o quinto e último degrau com 45,5 mm. Os desenhos mencionados fornecem todas as dimensões em milímetros das chapas para a composição dessa secção circular.

### **3.8.3 - Arquitetura dos enrolamentos - Alimentador - SLM-01C3**

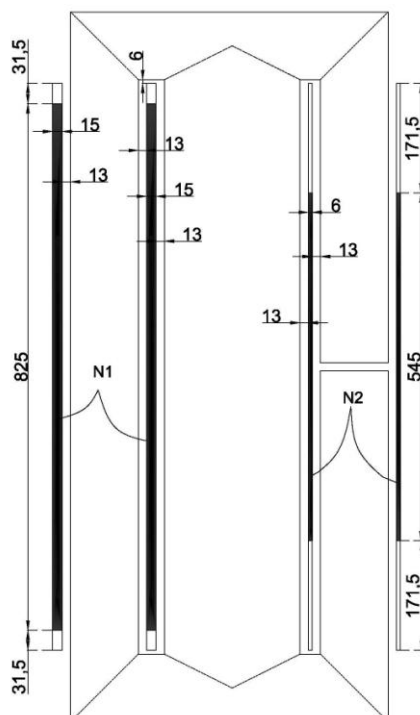
As Figuras 3.28 e 3.29 fornecem a especificação do número de espiras para cada um dos enrolamentos envolvidos, N1 e N2, e as posição de montagem de cada um dos enrolamentos nas diferentes colunas do protótipo.

Neste mesmo desenho, Figuras 3.28 e 3.29, especificam-se a forma como cada enrolamento deverá ser construído e os materiais condutores necessários para isso. Foi usado no enrolamento N1 um condutor de secção de área retangular de 24,14 mm<sup>2</sup>, 5,0 mm de largura e 5,0 mm de espessura, sendo constituído de 495 espiras disposta em 3 (três) camadas. No enrolamento N2 foi usado um condutor de seção de área retangular de 58,6 mm<sup>2</sup>, 9 mm de largura e 6,0 mm de espessura, sendo constituído de 81 espiras disposta em 1 (uma) camada.

Para nortear o fabricante, calculou-se o peso total de cobre previsto para a confecção de todos os enrolamentos do protótipo (três unidades monofásicas), o que resulta em aproximadamente 159,1kg.



**Figura 3.28** – Arquitetura dos enrolamentos – Estrutura ferromagnética Assimétrica (todas as unidades estão em milímetros) – SLM-01C3.



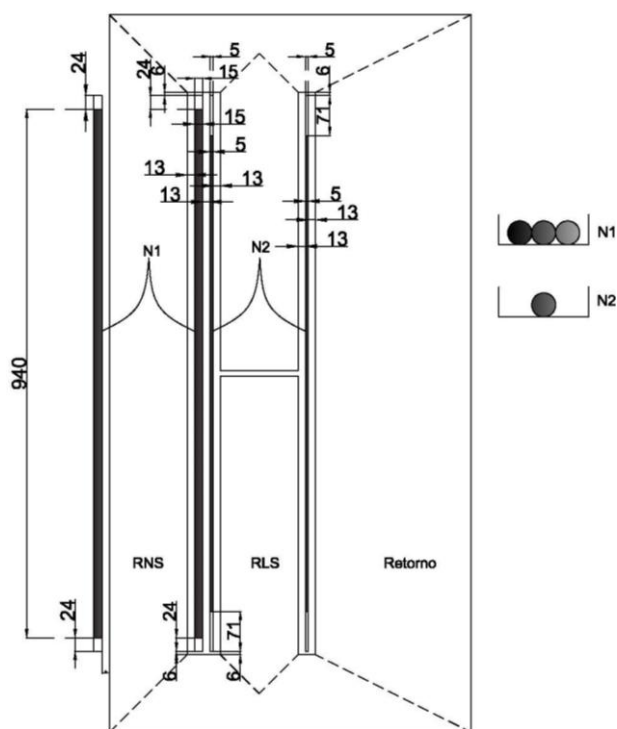
**Figura 3.29** – Arquitetura dos enrolamentos – Estrutura ferromagnética Simétrica (todas as unidades estão em milímetros) – SLM-01C3.

### 3.8.4 – Arquitetura dos enrolamentos - Alimentador - ITA-03

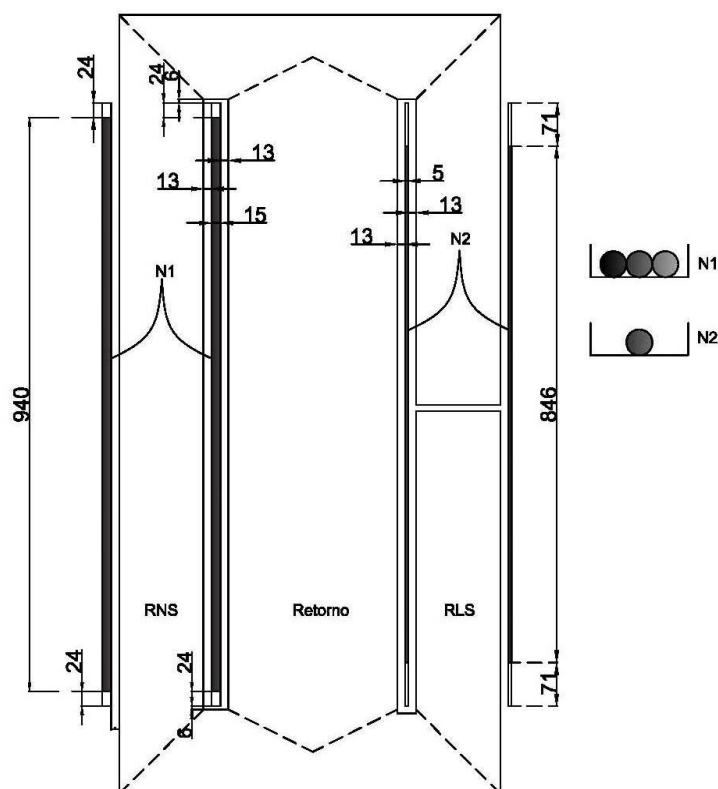
As Figuras 3.30 e 3.31 fornecem a especificação do número de espiras para cada um dos enrolamentos envolvidos, N1 e N2, e as posição de montagem de cada um dos enrolamentos nas diferentes colunas do protótipo.

Neste mesmo desenho, Figuras 3.30 e 3.31, especificam-se a forma como cada enrolamento deverá ser construído e os materiais condutores necessários para isso. Foi usado no enrolamento N1 um condutor de seção de área retangular de 24,14 mm<sup>2</sup>, 5,0 mm de largura e 5,0 mm de espessura, sendo constituído de 564 espiras disposta em 3 (três) camada. No enrolamento N2 foi usado um condutor de seção de área retangular de 34,66 mm<sup>2</sup>, 5 mm de largura e 6,0 mm de espessura, sendo constituído de 141 espiras disposta em 1 (uma) camada.

Para nortear o fabricante, calculou-se o peso total de cobre previsto para a confecção de todos os enrolamentos do protótipo (três unidades monofásicas), o que resulta em aproximadamente 240,4kg.



**Figura 3.30** – Arquitetura dos enrolamentos – Estrutura ferromagnética Assimétrica (todas as unidades estão em milímetros) – ITA-01C3.



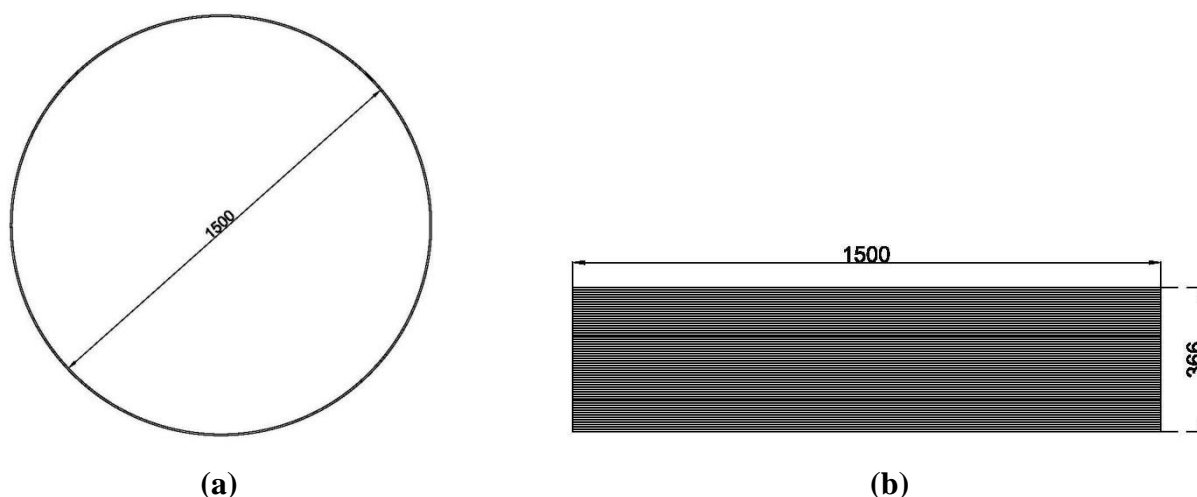
**Figura 3.31** – Arquitetura dos enrolamentos – Estrutura ferromagnética Simétrica (todas as unidades estão em milímetros) – ITA-01C3.

### 3.8.5 – Dimensões Físicas – Bobina de Núcleo de Ar

Uma vez que o alimentador de ITA-03 não possui bobina com núcleo de ar, todos os desenhos de projetos mostrados nas seções a seguir serão para o alimentador de SLM-01C3.

#### 3.8.5.1 – Bobina Curta

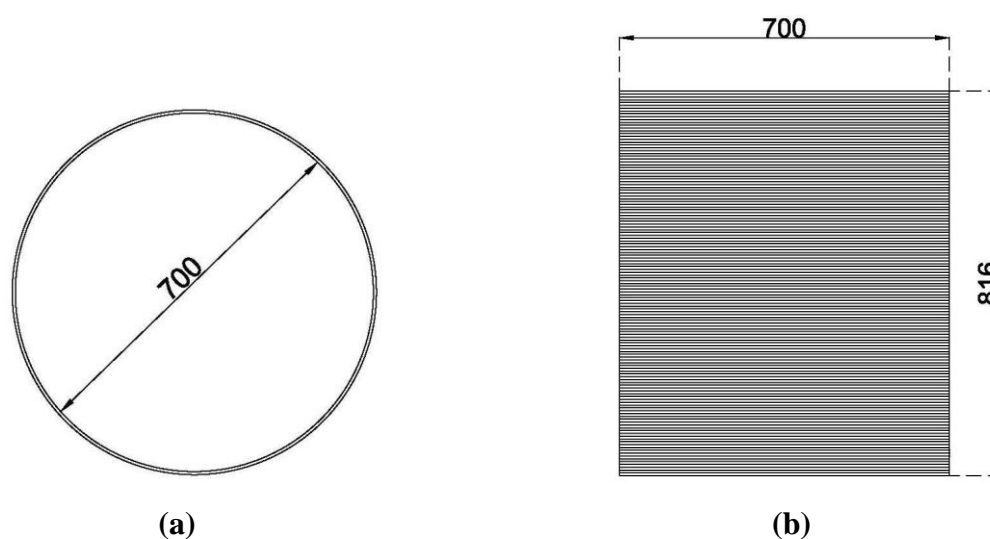
A Figura 3.32 mostra o desenho com as dimensões físicas para confecção do RLS com núcleo de ar. Neste desenho, a estrutura da bobina é definida nos seus aspectos gerais, como assinala o desenho, a bobina deverá exibir uma seção circular com diâmetro de 1500 mm e a altura de 366 mm. Foi usado um condutor de secção de área retangular de 34,66 mm<sup>2</sup>, 6,0 mm de largura e 6,0 mm de espessura, sendo constituído de 61 espiras disposta em 1 (uma) camada. Para nortear o fabricante, calculou-se o peso total de cobre previsto para a confecção da bobina, o que resulta em aproximadamente 88,57 kg para cada bobina monofásica.



**Figura 3.32** – Bobina curta (a) Vista Superior e (b) Vista Frontal.

### 3.8.5.2 – Bobina Longa

A Figura 3.33 mostra o desenho com as dimensões físicas para confecção do RLS com núcleo de ar. Nestes desenhos, a estrutura da bobina é definida nos seus aspectos gerais, como assinala o desenho, a bobina deverá exibir uma seção circular com diâmetro de 700 mm e a altura de 816 mm. Foi usado um condutor de secção de área retangular de  $34,66 \text{ mm}^2$ , 6,0 mm de largura e 6,0 mm de espessura, sendo constituído de 136 espiras disposta em 1 (uma) camada. Para nortear o fabricante, calculou-se o peso total de cobre previsto para a confecção da bobina, o que resulta em aproximadamente 92,15 kg para cada bobina monofásica.



**Figura 3.33** – Bobina Longa (a) Vista superior e (b) Vista frontal.

## CAPÍTULO 4

### DADOS EXPERIMENTAIS E DE SIMULAÇÃO DO ARMTRS - 380V- PROTÓTIPO DE BANCADA

#### 4.1 - Considerações preliminares

Objetivando realizar experimentações laboratoriais foram projetadas unidades monofásicas para duas estruturas distintas de protótipo do ARMTRS denominadas de Estrutura Assimétrica e Estrutura Simétrica, como foi mostrado nas Figuras 3.6 (a) e 3.6 (b).

As características elétricas para o protótipo de bancada foram levantadas em laboratórios para verificar os conceitos empregados em sua construção, uma vez que dificilmente as características obtidas por simulação serão exatamente reproduzidas no processo construtivo.

Na fase de simulação só se tem acesso a característica  $B \times H$  da chapa, a qual é fornecida pelo fabricante. Em virtude de esta característica original diferir da característica de saturação dos núcleos devido o fator de empilhamento e de entreferros introduzidos no processo construtivo, o levantamento da curva característica  $\lambda \times i$  do RNS e  $V \times i$  do RLS é essencial para que se possa simular as estruturas construídas, retratando-a de forma mais fiel possível.

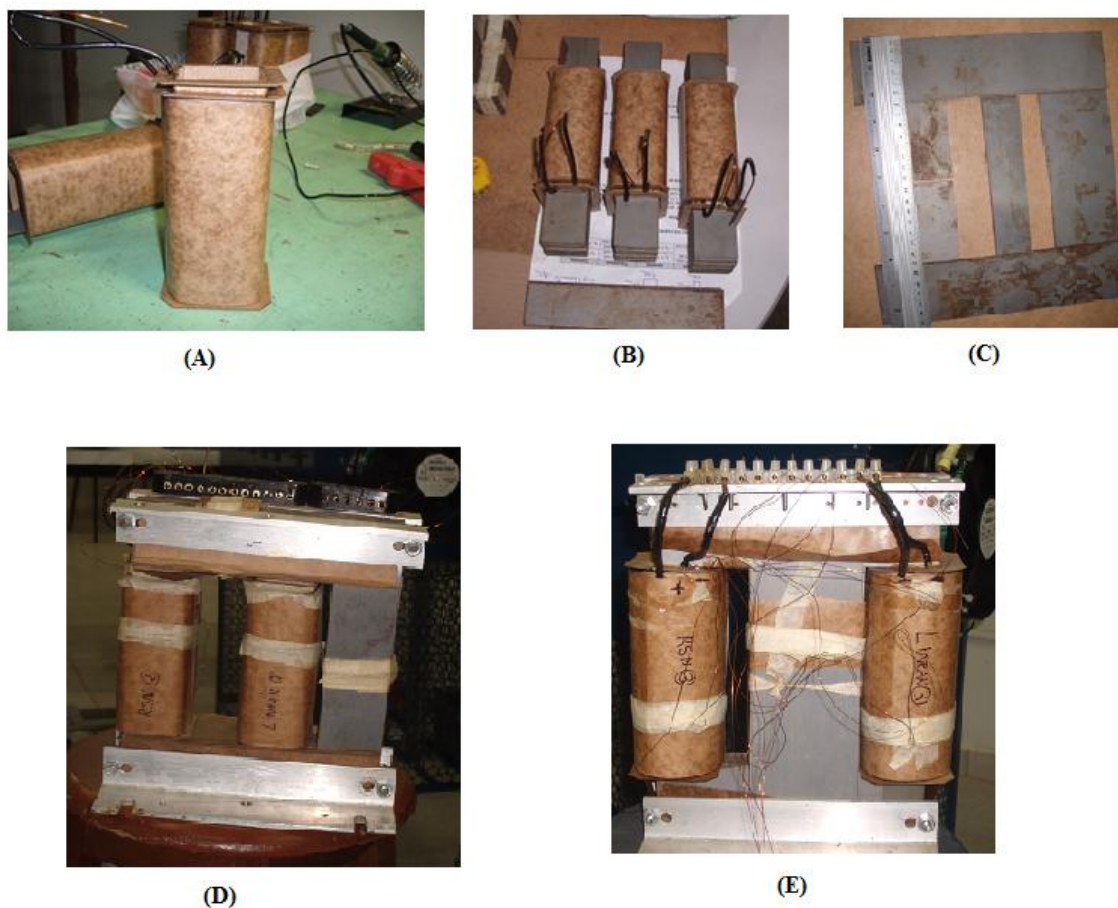
#### 4.2 - Dimensionamento e montagem dos protótipos de bancada 380 V

As estruturas ferromagnéticas do protótipo de bancada do ARMTRS-380V foram dimensionadas sob os mesmos princípios usados para o protótipo do cabeça de série ARMTRS-13,8kV apresentados no capítulo 3. Diferindo deste, apenas pela ausência da bobina de núcleo de ar que não compõe o protótipo de bancada.

Um conjunto de fotos das peças de aço silício utilizado para construção dos núcleos do protótipo de bancada e das bobinas é mostrado na Figura 4.1.

As chapas são montadas com a superposição de uma sobre a outra. Essa forma de montagem é a mais usual para transformadores de pequeno porte, porém, como o RNS tem

seu ponto de operação com elevados valores da indução magnética tal procedimento levará a um alto nível de perda e dificultará um controle na inclinação da curva  $V \times I$ . As perdas podem ser controladas com a introdução de retraços entre as chapas superpostas. A tarefa de corte e montagem foi realizada pela N2A Equipamentos.



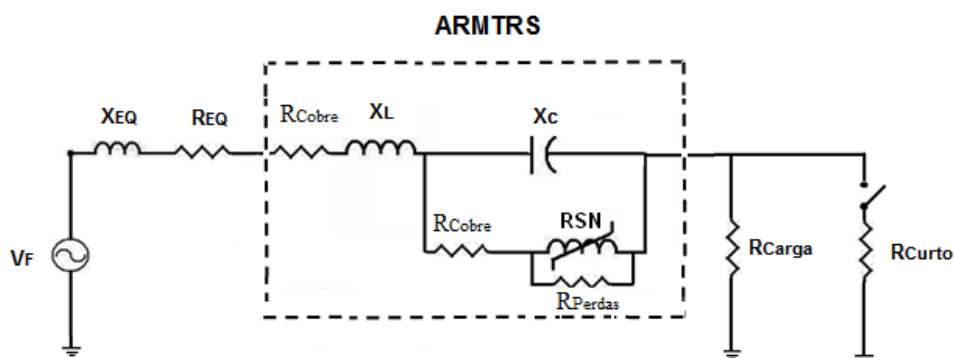
**Figura 4.1** – (A) Representa umas das bobinas construídas; (B) Representa as bobinas com as chapas de aço parcialmente montadas; (C) Representa a forma de montagem dos protótipos; (D) Representa a Estrutura Assimétrica construída e (E) Representa a Estrutura Simétrica construída.

Os desenhos com todas as dimensões usadas para a construção dos protótipos tanto para a Estrutura Assimétrica quanto para a Estrutura Simétrica encontram nos Anexos 7.2 e 7.3, respectivamente. O Anexo 7.4 mostra a curva de magnetização e perdas do aço E-004 e os pontos dessas curvas ambos fornecidos pelo fabricante.



### 4.3 – Modelagem do sistema

A Figura 4.2 e a Tabela 4.1 mostram o esquema de montagem do sistema e os dados usados nos experimentos e simulações do protótipo de bancada do ARMTRS, respectivamente. O sistema foi montado com uma fonte de tensão senoidal e uma impedância equivalente descrita no Anexo 7.5, também fazem parte desse sistema a carga nominal representada por uma resistência descrita no Anexo 7.6, um defeito representado também por uma resistência descrita no Anexo 7.7 e os componente do ARMTRS (RLS, RNS e BCS), o Anexo 7.8 mostra ensaio para obtenção da reatância capacitiva. A chave usada para estabelecer o curto-circuito no sistema foi fabricada pela N2A EQUIPAMENTO descrita conforme [16].



**Figura 4.2** – Montagem do sistema para experimentação e simulação.

**Tabela 4.1** – Dados do Sistema para experimento e simulação.

	<i>Estrutura Assimétrica</i>	<i>Estrutura Simétrica</i>
$V_F$ ( $V_{RMS}$ )		220
$X_{Eq}$ ( $\Omega$ )		5,5
$R_{Eq}$ ( $\Omega$ )		0,06
$R_{cobre}$ ( $\Omega$ )	0,3	0,07
$X_L$ ( $\Omega$ )	3,2	3,5
$X_C$ ( $\Omega$ )		4,5
$R_{Carga}$ ( $\Omega$ )		72
$R_{Curto}$ ( $\Omega$ )		25,25
$R_{Perdas}$ ( $\Omega$ )		325

A corrente de carga do sistema em regime normal de operação é de aproximadamente  $3A_{RMS}$  conforme mostra a expressão 4.1.

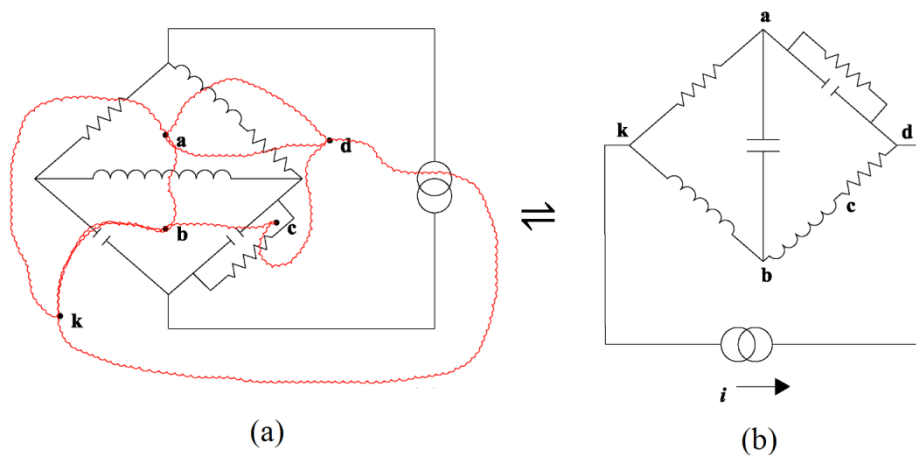
$$I_{carga} = \frac{220}{72 + j4,2} = 3,0 \angle - 3,34^\circ A_{RMS} \quad (4.1)$$

O programa EMTP-ATP foi utilizado como ferramenta para a modelagem e análise do sistema mostrado na Figura 4.2. A modelagem da fonte de tensão, dos elementos lineares, da carga e do defeito forma modelados conforme procedimentos descritos em [3]. A ferramenta FEMM foi usada para análise do comportamento magnético das estruturas ferromagnéticas do ARTMTRS.

#### 4.3.1 - Modelagem do RNS

O RNS, elemento não linear do ARMTRS, foi modelado com e sem a dualidade eletromagnética equivalente do circuito e foram usados os elementos *nonlinear current-dependent inductor* (TYPE 98 e 96) disponível no *software* EMTP-ATP. Conforme [3] na implementação do modelo do indutor não-linear no EMTP-ATP, o elemento requerido é a característica *fluxo de enlace*  $\times$  *corrente* ( $\lambda \times i$ ) do mesmo, a qual deverá ser determinada diretamente por meio de ensaios no dispositivo com a utilização de uma placa integradora.

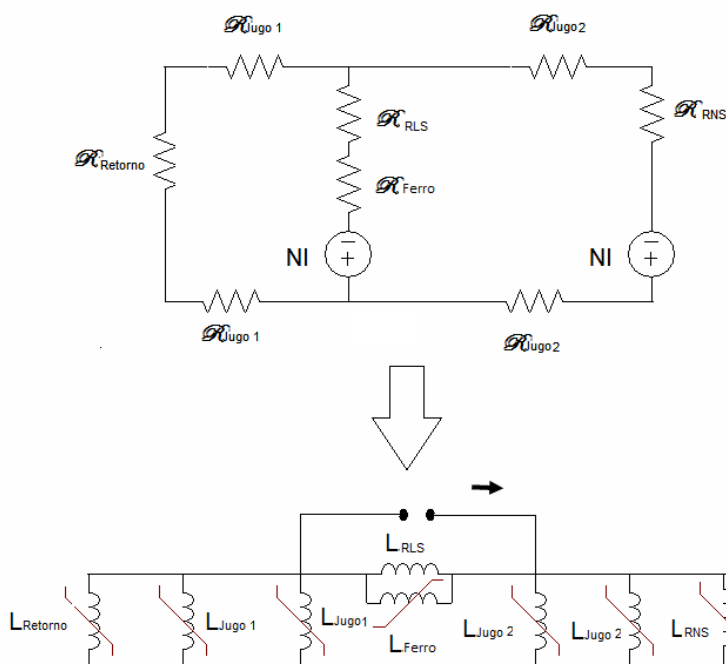
A equivalência da dualidade entre o circuito elétrico e o circuito magnético usado nesse trabalho é baseada na regra Cherry [17] e [18]. De acordo com Cherry a dualidade entre os circuitos é obtido marcando um ponto (a,b,...) dentro de cada mecha do circuito como mostra a Figura 4.3 (a) e um outro ponto externo ao circuito (k). Estes pontos, quando juntados pelas linhas pontilhadas formam o ponto de junção do circuito dual, como podem ser visto na Figura 4.3 (b). Este circuito dual agora tem impedâncias inseridas nos ramos  $Z_1, Z_2, Z_3...$  que são proporcionais às admitâncias  $a_1, a_2, a_3...$  no correspondente (cruzamento) ramo do circuito da Figura 4.3 (a) no sentido  $Z_1 : Z_2 : Z_3 : \dots = a_1 : a_2 : a_3 : \dots$  ou  $Z_n = K^2_{an}$ , onde K é uma constante real.



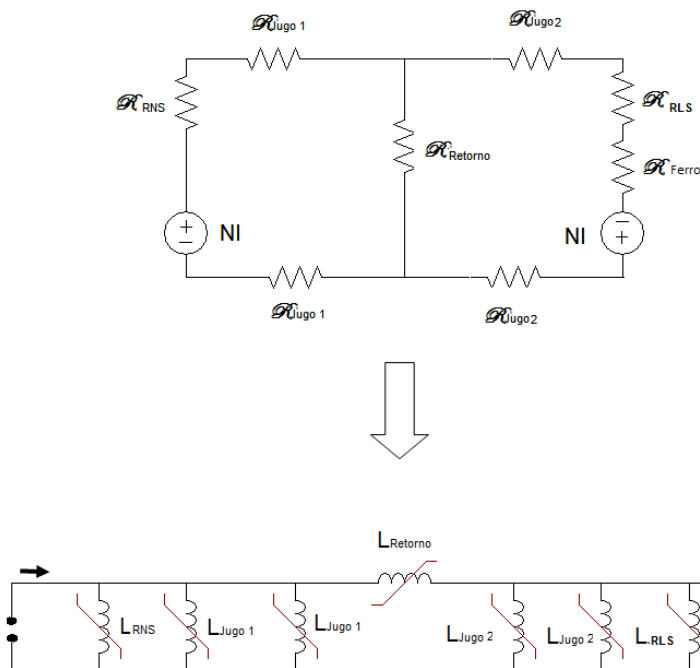
**Figura 4.3** – Circuito dual equivalente.

#### 4.3.1.1 – Dualidade da Estrutura Assimétrica e Simétrica

As Figuras 4.4 e 4.5 mostram o circuito dual usado para a Estrutura Assimétrica e Simétrica, respectivamente, onde pode ser visto que além do RNS, o retorno e os jugos (culatras) foram representados por elementos não lineares.



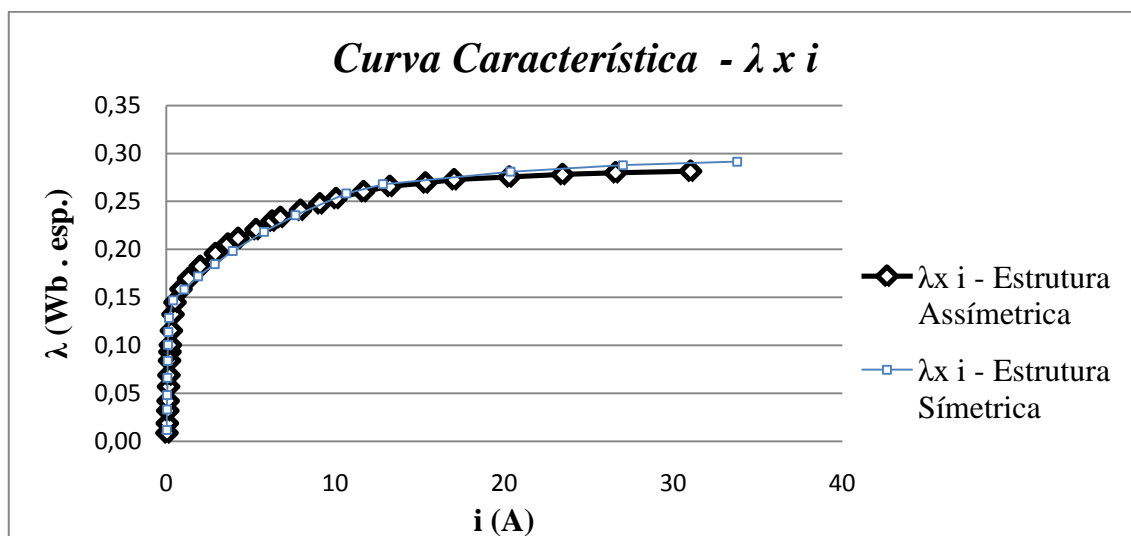
**Figura 4.4** – Montagem do sistema Dualidade da Estrutura Assimétrica.



**Figura 4.5** – Montagem do sistema Dualidade da Estrutura Simétrica.

#### 4.3.2 – Curva característica $\lambda \times i$ do RNS

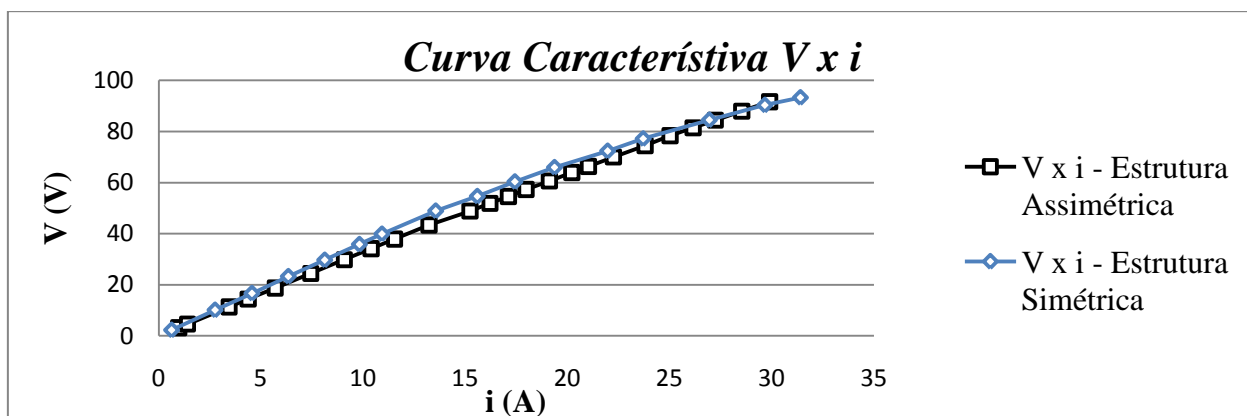
As curvas características  $\lambda \times i$  dos RNS's foram levantadas por meio de ensaio como descrito em [3] e os resultados de ensaio para esse elemento se encontra no Anexo 7.9. A Figura 4.6 mostra as curvas características  $\lambda \times i$  para a Estrutura Assimétrica e Estrutura Simétrica, respectivamente.



**Figura 4.6** – Curva característica  $\lambda \times i$ .

### 4.33 – Curva característica $V \times i$ do RLS

As curvas características  $V \times i$  do RLS's também foram levantadas por meio de ensaio como descrito em [3] e os resultados de ensaio para esse elemento se encontra no Anexo 7.10. A Figura 4.7 mostra as curvas características  $V \times i$  para a Estrutura Assimétrica e Estrutura Simétrica, respectivamente.

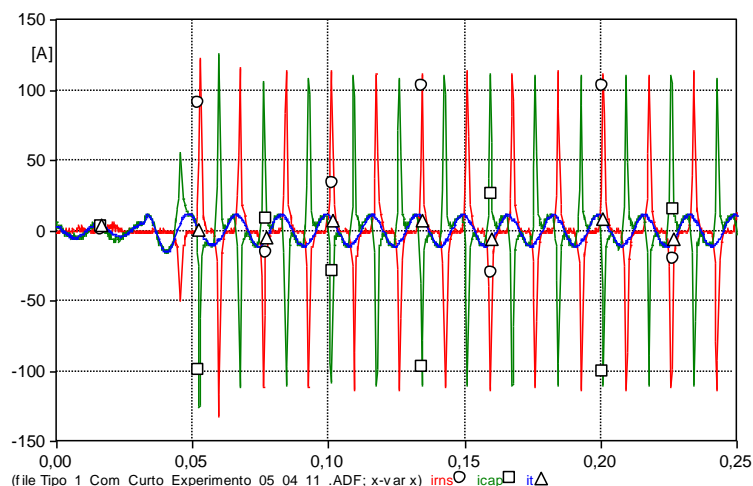


**Figura 4.7** – Curva característica  $V \times i$ .

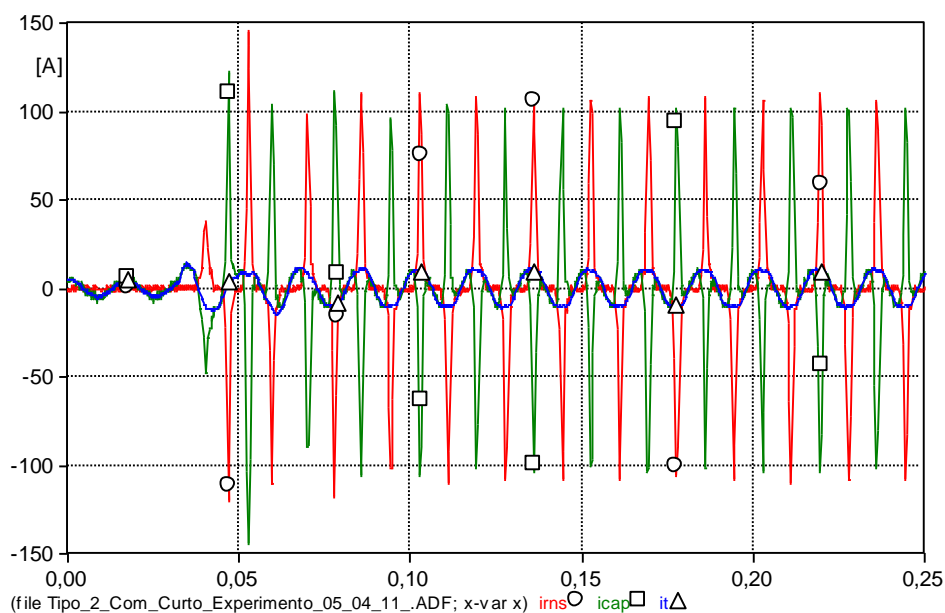
## 4.4 - Resultados Experimentais

Serão mostrados nessa seção todos os resultados obtidos em laboratório tanto para a Estrutura Assimétrica quanto para a Estrutura Simétrica.

A Figura 4.8 mostra as formas de onda da corrente de carga, do RNS e do BCS para a Estrutura Assimétrica em regime permanente de operação, no transitório e durante o defeito. Já a Figura 4.9 mostra os resultados das correntes para a Estrutura Simétrica.

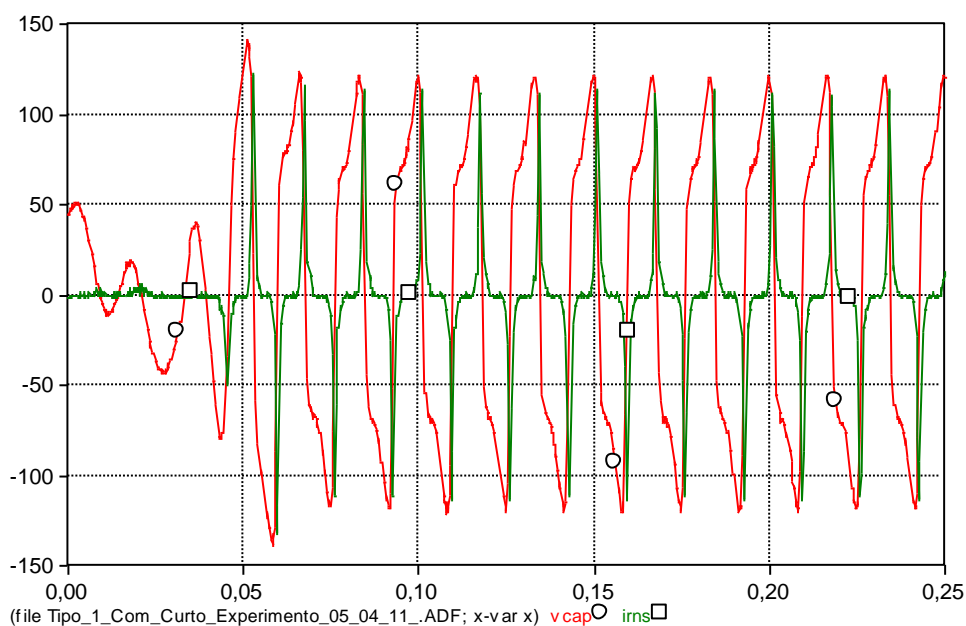


**Figura 4.8** – Forma de onda da corrente de carga ( $\Delta$ ), RNS ( $\circ$ ) e BCS ( $\square$ ) para a Estrutura Assimétrica em regime permanente, no transitório e durante um defeito.

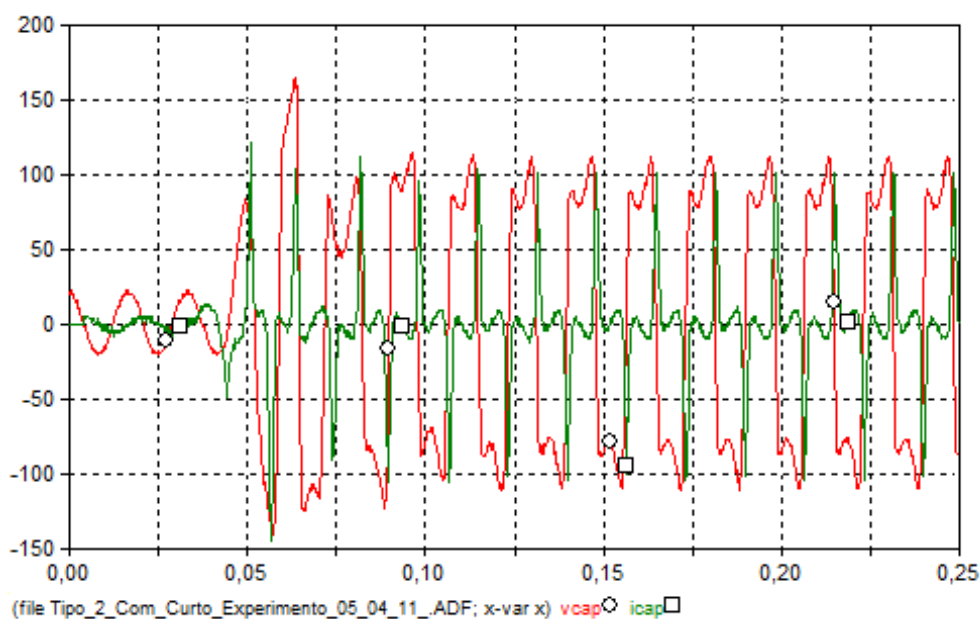


**Figura 4.9** – Forma de onda da corrente de carga ( $\Delta$ ), RNS ( $\circ$ ) e BCS ( $\square$ ) para a Estrutura Simétrica em regime permanente, no transitório e durante um defeito.

As Figuras 4.10 e 4.11 mostram as formas de onda da tensão e da corrente submetida aos terminais do RNS para a Estrutura Assimétrica e Simétrica, respectivamente, ficando evidente que o RNS entra em seu estado de saturação quando o valor da tensão de saturação é ultrapassado.

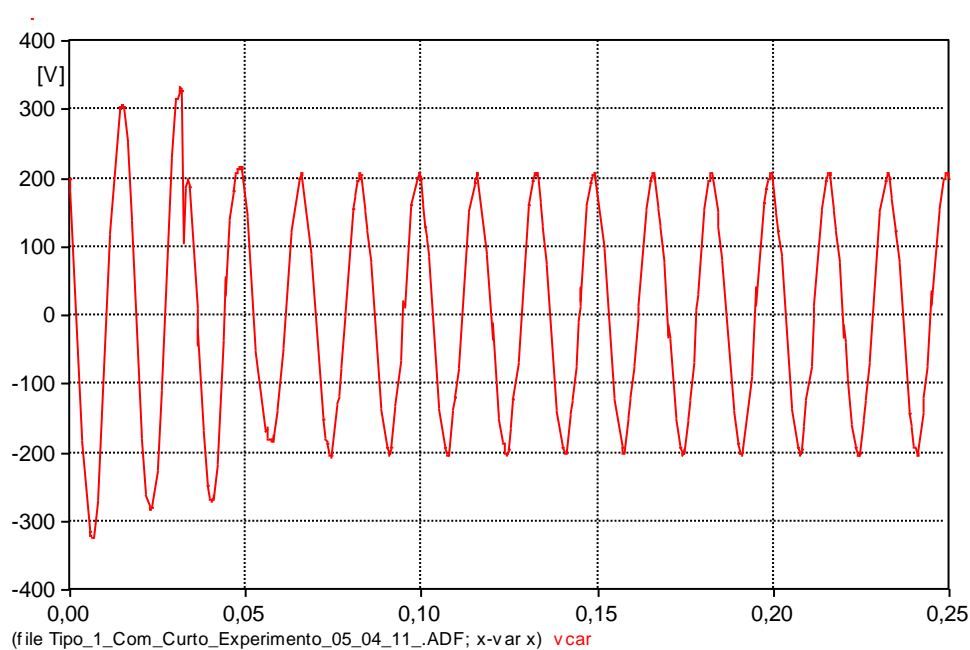


**Figura 4.10** – Forma de onda da tensão ( $\circ$ ) e da corrente ( $\square$ ) no RNS para a Estrutura Assimétrica em regime permanente, no transitório e durante um defeito.

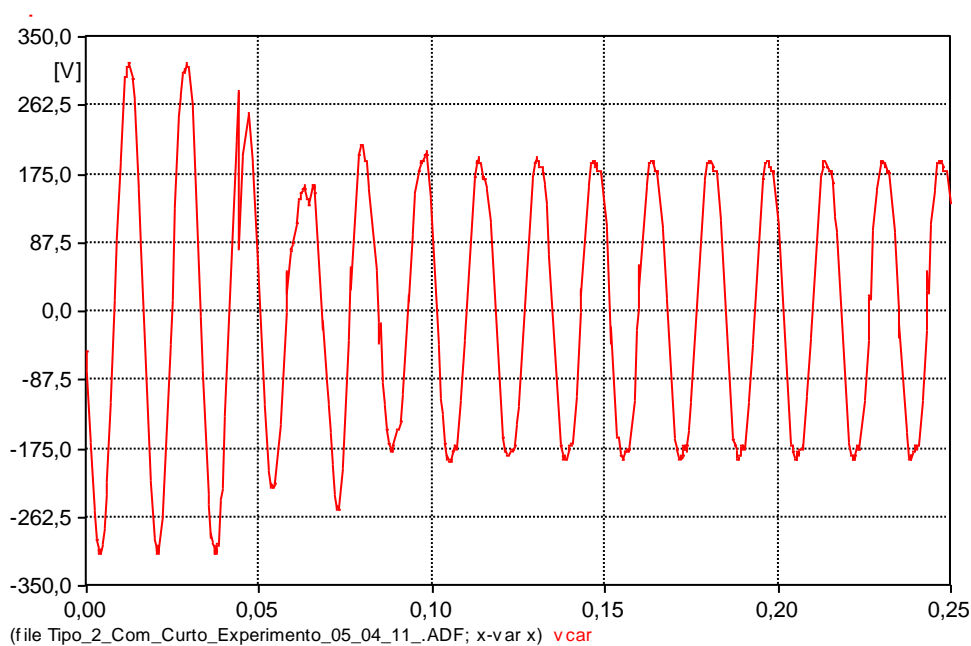


**Figura 4.11** – Forma de onda da tensão ( $\circ$ ) e da corrente ( $\square$ ) no RNS para a Estrutura Simétrica em regime permanente, no transitório e durante um defeito.

As Figuras 4.12 e 4.13 mostram as formas de onda da tensão submetida à carga tanto para a Estrutura Assimétrica quanto para a Estrutura Simétrica, respectivamente.



**Figura 4.12** – Forma de onda da tensão na carga para a Estrutura Assimétrica em regime permanente, no transitório e durante um defeito.



**Figura 4.13** – Forma de onda da tensão na carga para a Estrutura Simétrica em regime permanente, no transitório e durante um defeito.

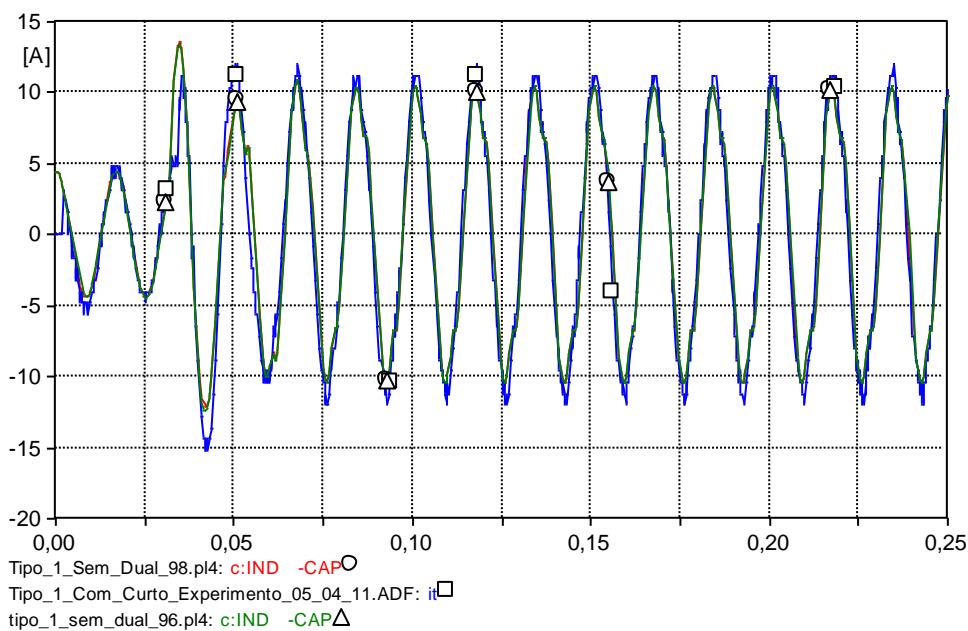
## 4.5 - Resultados de Simulação

Os resultados obtidos em simulação serão mostrados nessa seção e serão comparados com os resultados obtidos experimentalmente com o intuito de avaliar se o modelo simulado representa de forma aceitável o sistema experimentado. O roteiro em ATP para os sistemas simulados encontram-se no Apêndice 6.10 a 6.17.

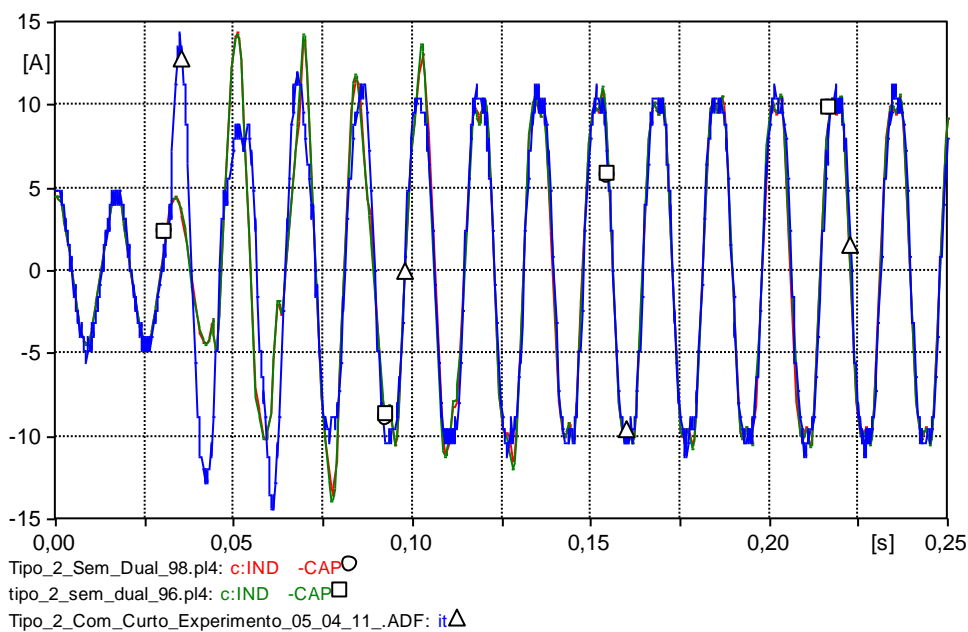
### 4.5.1 - Resultados de Simulação sem dualidade eletromagnética

As Figuras 4.14 e 4.15 mostram a forma de onda da corrente de carga para a Estrutura Assimétrica e Estrutura Simétrica, respectivamente. Para os resultados de simulação foram usados os elementos *nonlinear current-dependent inductor* (TYPE 98 e 96) disponível no *software* EMTP-ATP. Conforme [19] a característica  $\lambda x i$  do elemento TYPE 96 deve ser obtida através de um laço de histerese descrita no Anexo 7.11.



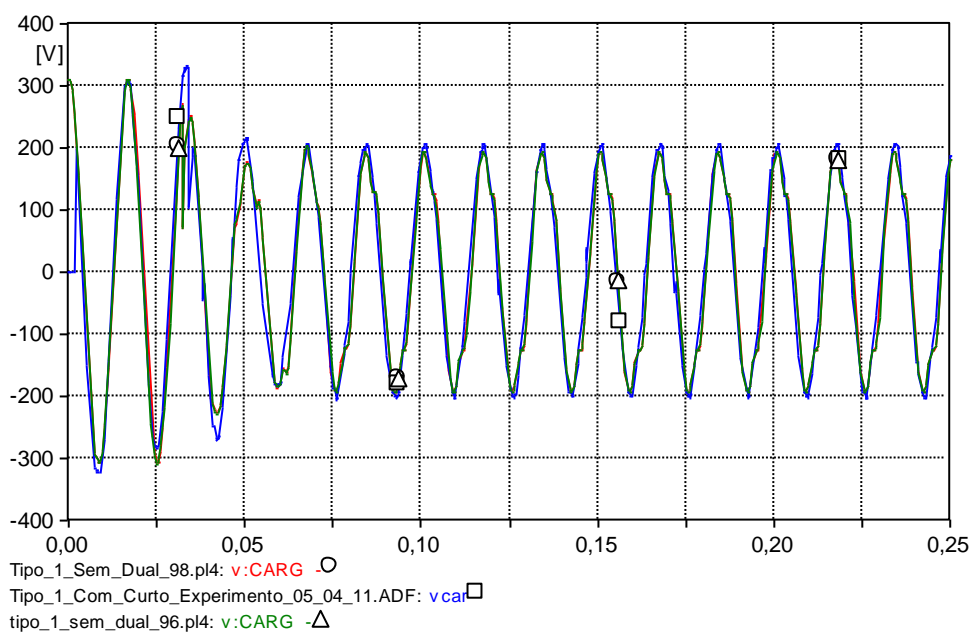


**Figura 4.14** – Forma de onda da corrente de carga para a Estrutura Assimétrica. Type 98 (○), Type 96 (Δ) e Experimento (□).

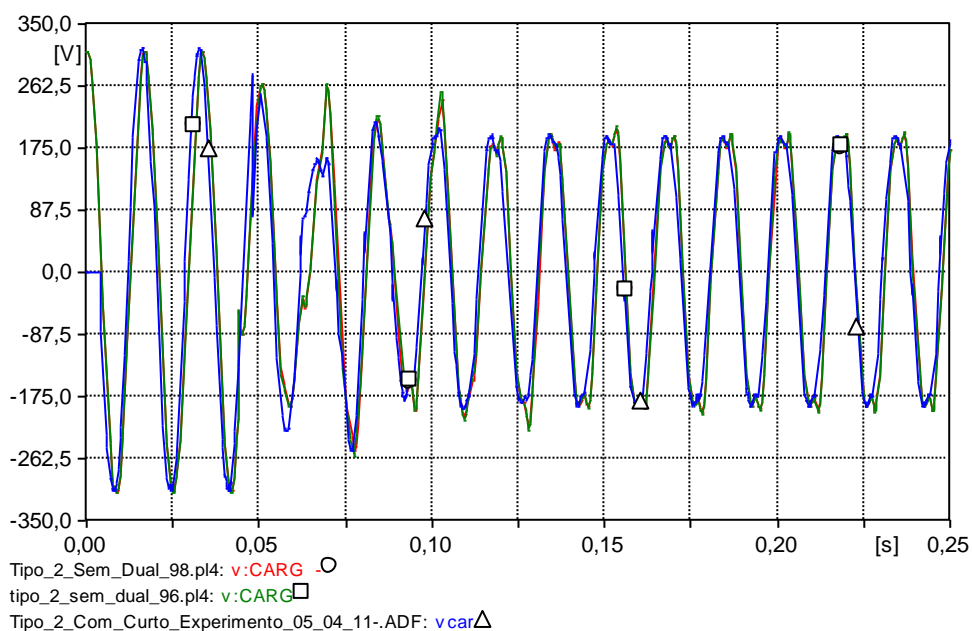


**Figura 4.15** – Forma de onda da corrente de carga para a Estrutura Simétrica. Type 98 (○), Type 96 (Δ) e Experimento (□).

As Figuras 4.16 e 4.17 mostram a forma de onda da tensão de carga para a Estrutura Assimétrica e Estrutura Simétrica, respectivamente.

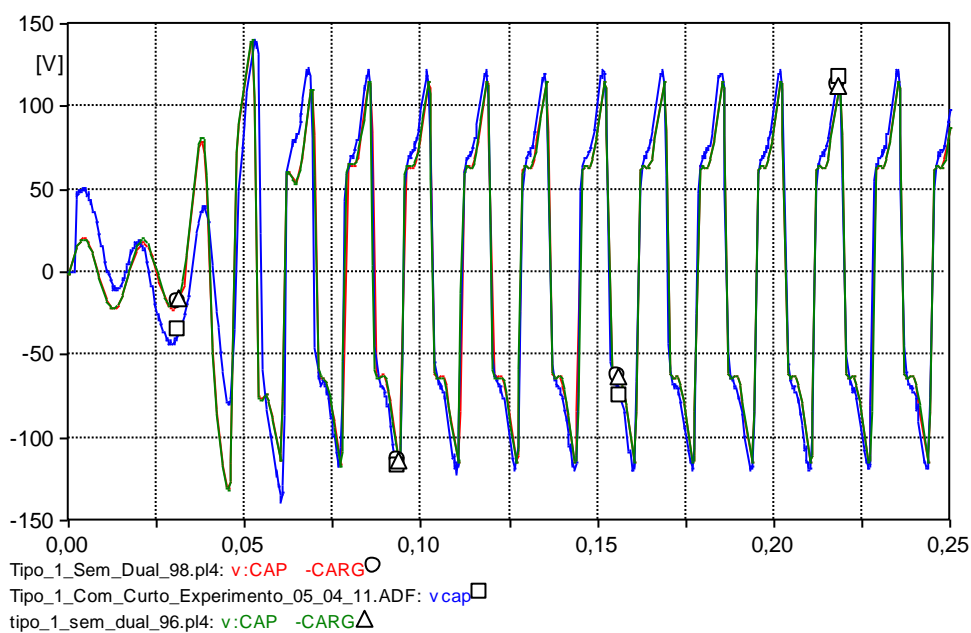


**Figura 4.16** – Forma de onda da tensão na carga para a Estrutura Assimétrica. Type 98 ( $\circ$ ), Type 96 ( $\Delta$ ) e Experimento ( $\square$ ).

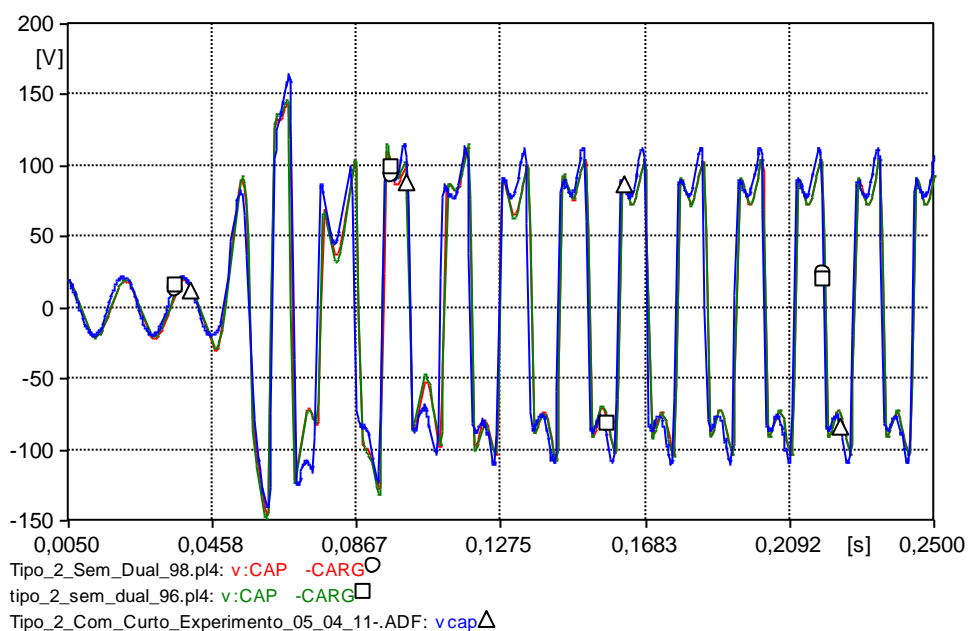


**Figura 4.17** – Forma de onda da tensão na carga para a Estrutura Simétrica. Type 98 ( $\circ$ ), Type 96 ( $\Delta$ ) e Experimento ( $\square$ ).

As Figuras 4.18 e 4.19 mostram a forma de onda da tensão no BCS e RNS para a Estrutura Assimétrica e Estrutura Simétrica, respectivamente.

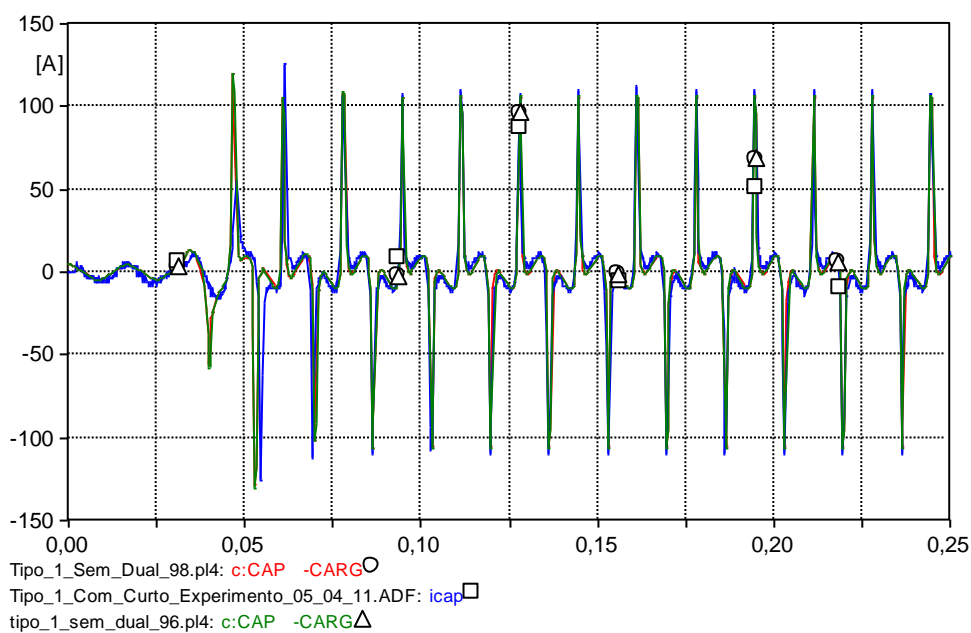


**Figura 4.18** – Forma de onda da tensão no BCS e RNS para a Estrutura Assimétrica. Type 98 (○), Type 96 (Δ) e Experimento (□).

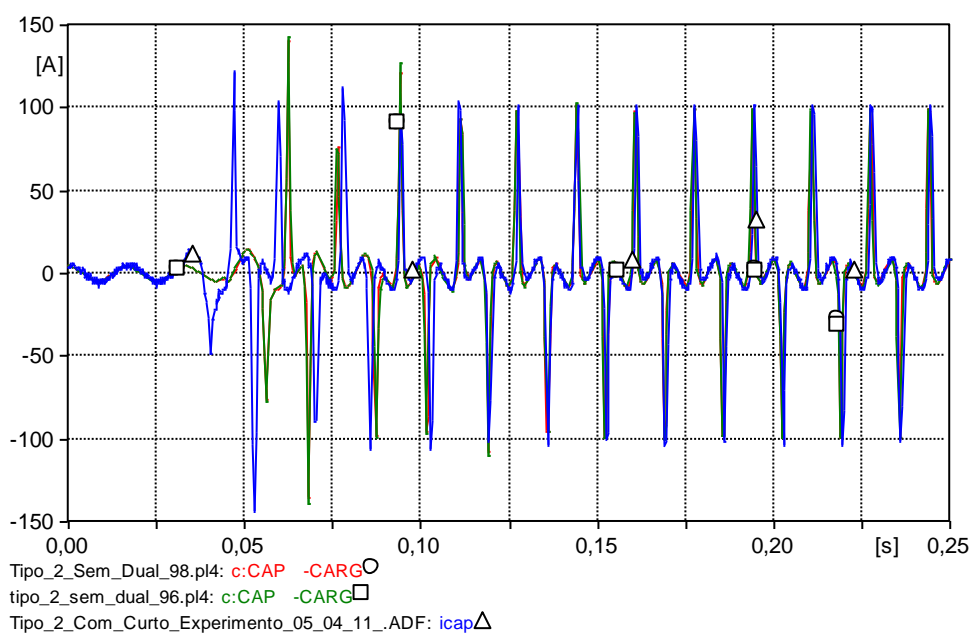


**Figura 4.19** – Forma de onda da tensão no BCS e RNS para a Estrutura Simétrica. Type 98 (○), Type 96 (Δ) e Experimento (□).

As Figuras 4.20 e 4.21 mostram a forma de onda da corrente no BCS para a Estrutura Assimétrica e Estrutura Simétrica, respectivamente.

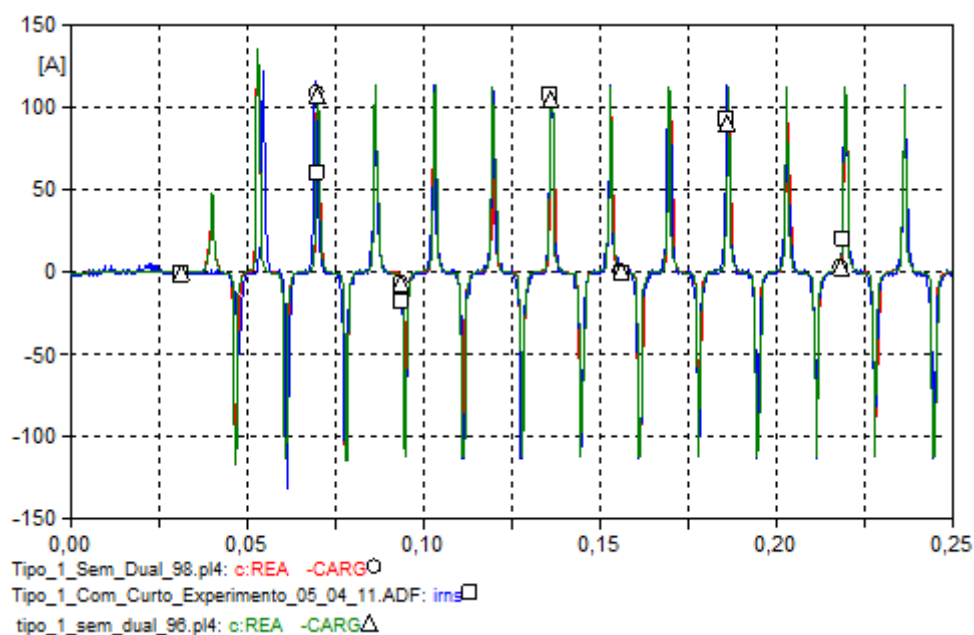


**Figura 4.20** – Forma de onda da corrente no BCS para a Estrutura Assimétrica. Type 98 (○), Type 96 (△) e Experimento (□).

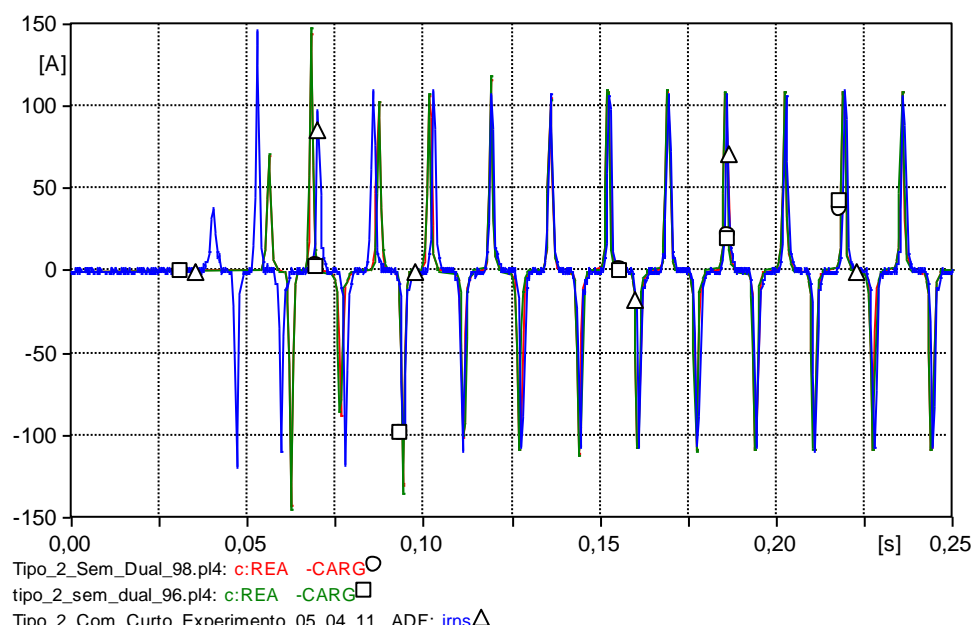


**Figura 4.21** – Forma de onda da corrente no BCS para a Estrutura Simétrica. Type 98 (○), Type 96 (△) e Experimento (□).

As Figuras 4.22 e 4.23 mostram a forma de onda da corrente no RNS para a Estrutura Assimétrica e Estrutura Simétrica, respectivamente.



**Figura 4.22** – Forma de onda da corrente no RNS para a Estrutura Assimétrica. Type 98 ( $\circ$ ), Type 96 ( $\Delta$ ) e Experimento ( $\square$ ).



**Figura 4.23** – Forma de onda da corrente no RNS para a Estrutura Simétrica. Type 98 ( $\circ$ ), Type 96 ( $\Delta$ ) e Experimento ( $\square$ ).

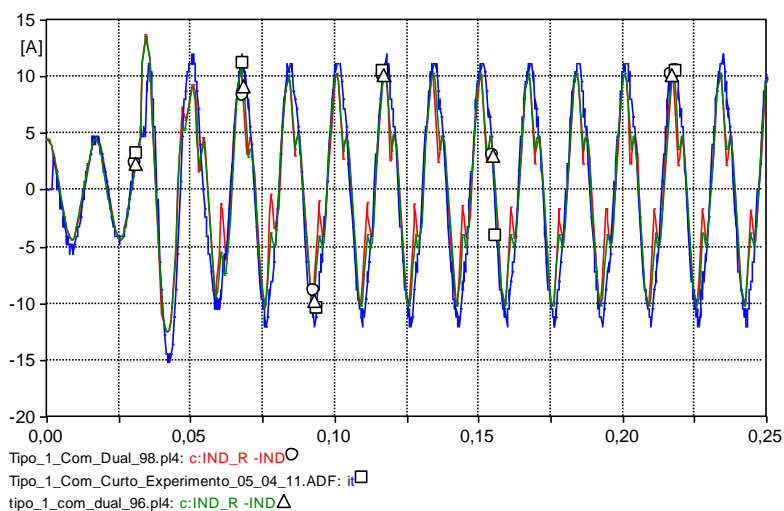
A Tabela 4.2 mostra os valores de corrente e de tensão do sistema obtidos em simulação e experimento.

Tabela 4.2 – Comparação dos resultados experimentados e simulados.

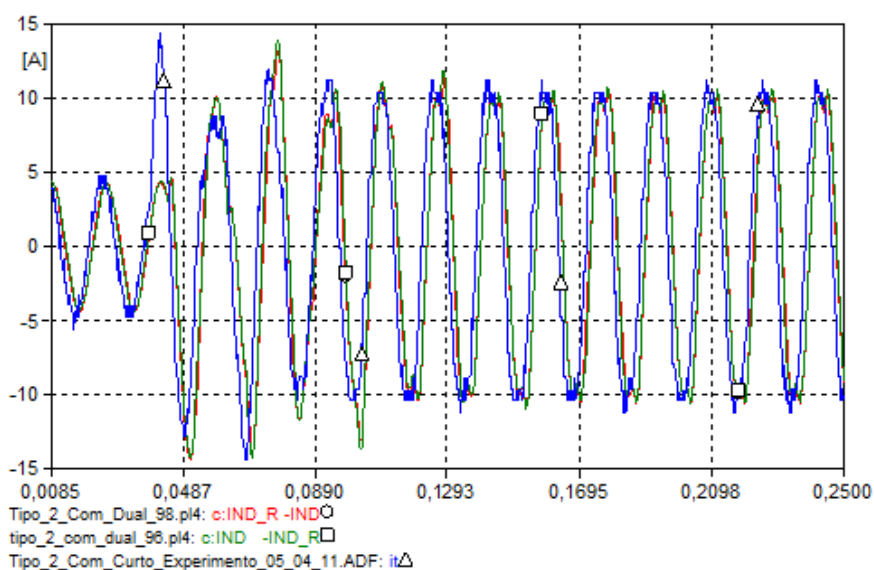
<b><u>Regime Permanente</u></b>						
	<b>Experimento</b>		<b>Simulação</b>			
	<b>Assimétrica</b>	<b>Simétrica</b>	<b>TYPE 98</b>		<b>TYPE 96</b>	
			<b>Assimétrica</b>	<b>Simétrica</b>	<b>Assimétrica</b>	<b>Simétrica</b>
<b>I<sub>Carga</sub> (A<sub>RMS</sub>)</b>	3,3	3,2	3,1	3,1	3,1	3,1
<b>V<sub>Carga</sub> (V<sub>RMS</sub>)</b>	222,0	223,3	219,4	220,0	219,4	219,6
<b>V<sub>BCS</sub> (V<sub>RMS</sub>)</b>	14,7	14,8	12,8	13,4	14,2	14,2
<b>I<sub>BCS</sub> (A<sub>RMS</sub>)</b>	3,3	3,2	3,1	3,2	3,3	3,3
<b>I<sub>RNS</sub> (A<sub>RMS</sub>)</b>	-	-	-	-	-	-
<b><u>Transitório</u></b>						
	<b>Experimento</b>		<b>Simulação</b>			
	<b>Assimétrica</b>	<b>Simétrica</b>	<b>TYPE 98</b>		<b>TYPE 96</b>	
			<b>Assimétrica</b>	<b>Simétrica</b>	<b>Assimétrica</b>	<b>Simétrica</b>
<b>I<sub>Carga</sub> (A<sub>PICO</sub>)</b>	15,2	14,4	12,1	14,3	12,3	14,3
<b>V<sub>Carga</sub> (V<sub>PICO</sub>)</b>	248	252	225,5	236,6	228,9	236,5
<b>V<sub>BCS</sub> (V<sub>PICO</sub>)</b>	139,2	140,8	113,9	146,2	113,9	146,5
<b>I<sub>BCS</sub> (A<sub>PICO</sub>)</b>	126	144	104,5	135,0	105,0	138,7
<b>I<sub>RNS</sub> (A<sub>PICO</sub>)</b>	116	120	108,3	141,6	108,1	144,7
<b><u>Durante um curto - circuito</u></b>						
	<b>Experimento</b>		<b>Simulação</b>			
	<b>Assimétrica</b>	<b>Simétrica</b>	<b>TYPE 98</b>		<b>TYPE 96</b>	
			<b>Assimétrica</b>	<b>Simétrica</b>	<b>Assimétrica</b>	<b>Simétrica</b>
<b>I<sub>Carga</sub> (A<sub>RMS</sub>)</b>	7,9	7,9	7,4	7,4	7,4	7,5
<b>V<sub>Carga</sub> (V<sub>RMS</sub>)</b>	147,1	135,8	137,2	137,3	136,9	138,9
<b>V<sub>BCS</sub> (V<sub>PICO</sub>)</b>	85,9	78,1	80,8	73,4	80,9	73,4
<b>I<sub>BCS</sub> (A<sub>PICO</sub>)</b>	76,4	72,1	74,7	69,9	74,9	70,1
<b>I<sub>RNS</sub> (A<sub>PICO</sub>)</b>	80,6	77,9	79,6	76,7	79,8	76,9

#### 4.5.2 – Resultados de Simulação com dualidade eletromagnética

As Figuras 4.24 e 4.25 mostram a forma de onda da corrente de carga para a Estrutura Assimétrica e Estrutura Simétrica, respectivamente. Para a modelagem com dualidade eletromagnética também foram usados os elementos *nonlinear current-dependent inductor* (TYPE 98 e 96). As curvas de magnetização para essa estrutura foram obtidas conforme [20] e equações 3.18 e 3.21. O anexo 7.12 mostra o levantamento dessas curvas.

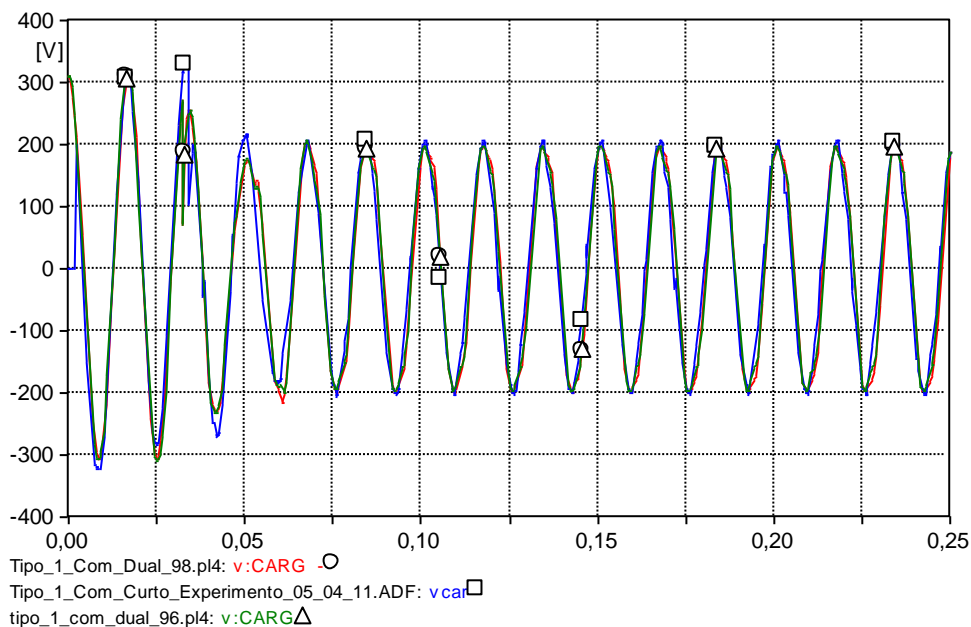


**Figura 4.24** – Forma de onda da corrente de carga para a Estrutura Assimétrica com dualidade eletromagnética. Type 98 (○), Type 96 (Δ) e Experimento (□).

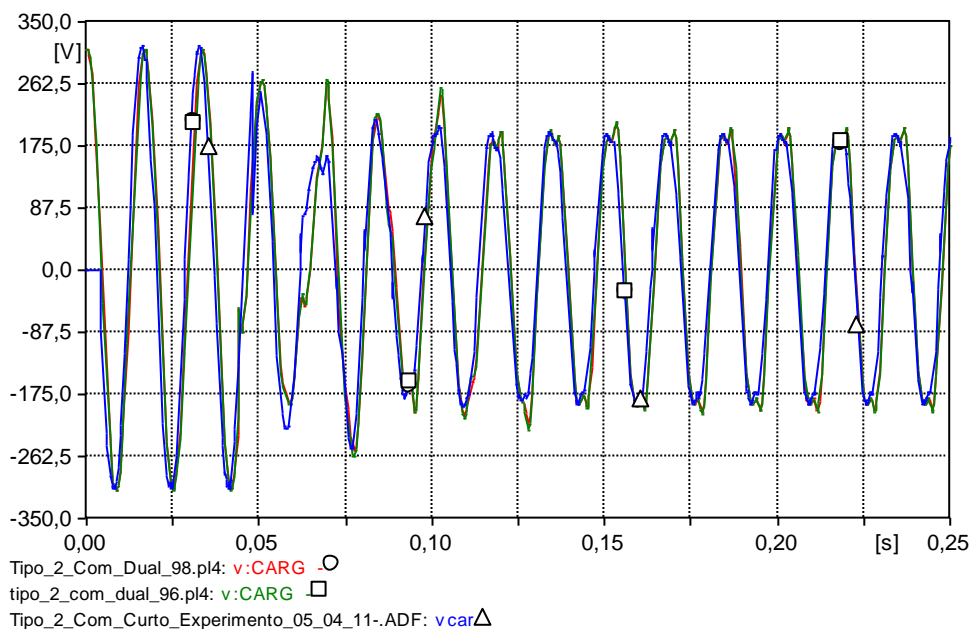


**Figura 4.25** – Forma de onda da corrente de carga para a Estrutura Simétrica com dualidade eletromagnética. Type 98 (○), Type 96 (Δ) e Experimento (□).

As Figuras 4.26 e 4.27 mostram a forma de onda da tensão de carga para a Estrutura Assimétrica e Estrutura Simétrica, respectivamente.



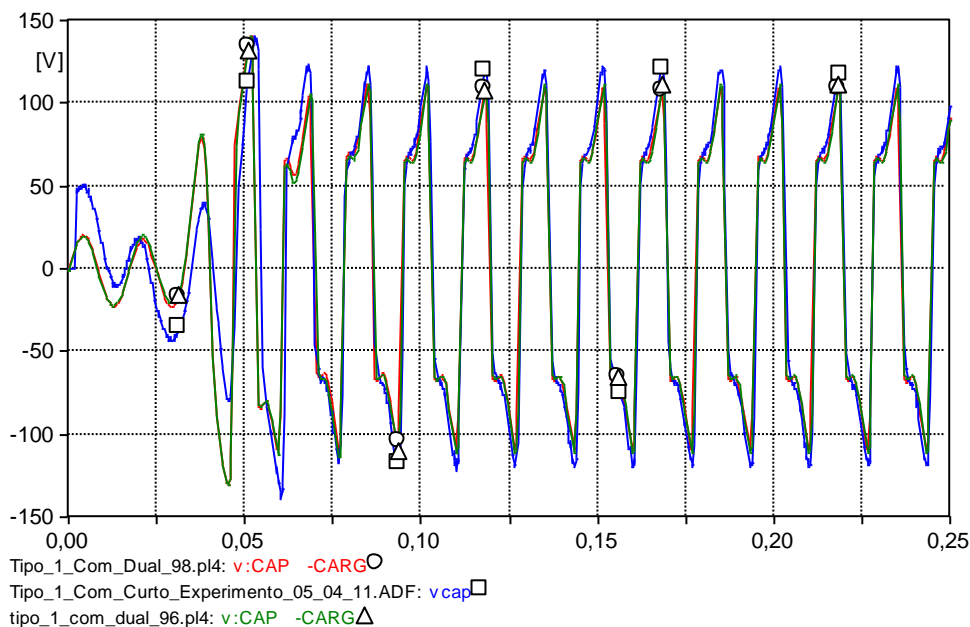
**Figura 4.26** – Forma de onda da tensão na carga para a Estrutura Assimétrica com dualidade eletromagnética. Type 98 ( $\circ$ ), Type 96 ( $\Delta$ ) e Experimento ( $\square$ ).



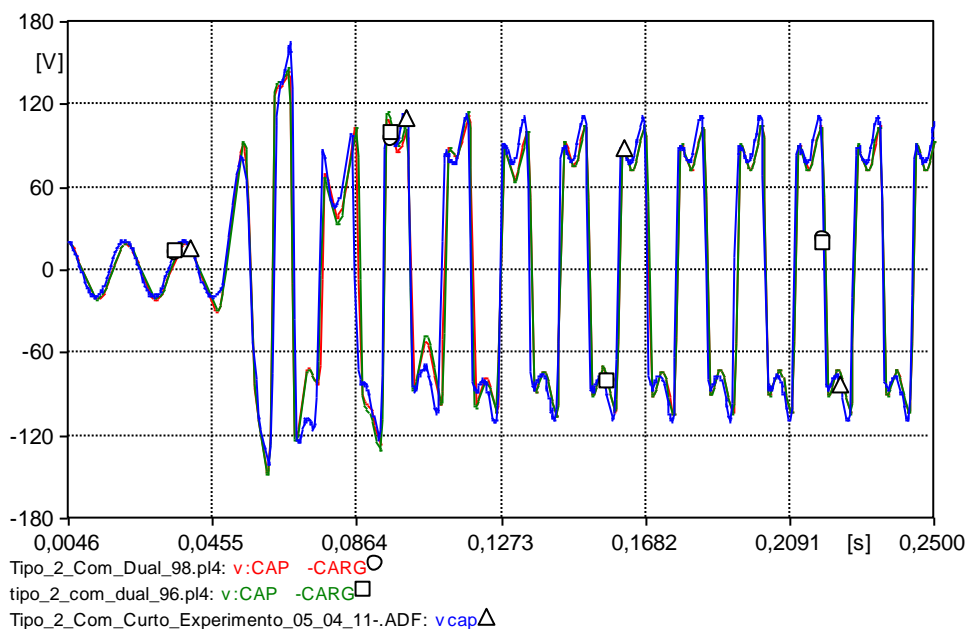
**Figura 4.27** – Forma de onda da tensão na carga para a Estrutura Simétrica com dualidade eletromagnética. Type 98 ( $\circ$ ), Type 96 ( $\Delta$ ) e Experimento ( $\square$ ).



As Figuras 4.28 e 4.29 mostram a forma de onda da tensão no BCS e RNS para a Estrutura Assimétrica e Estrutura Simétrica, respectivamente.

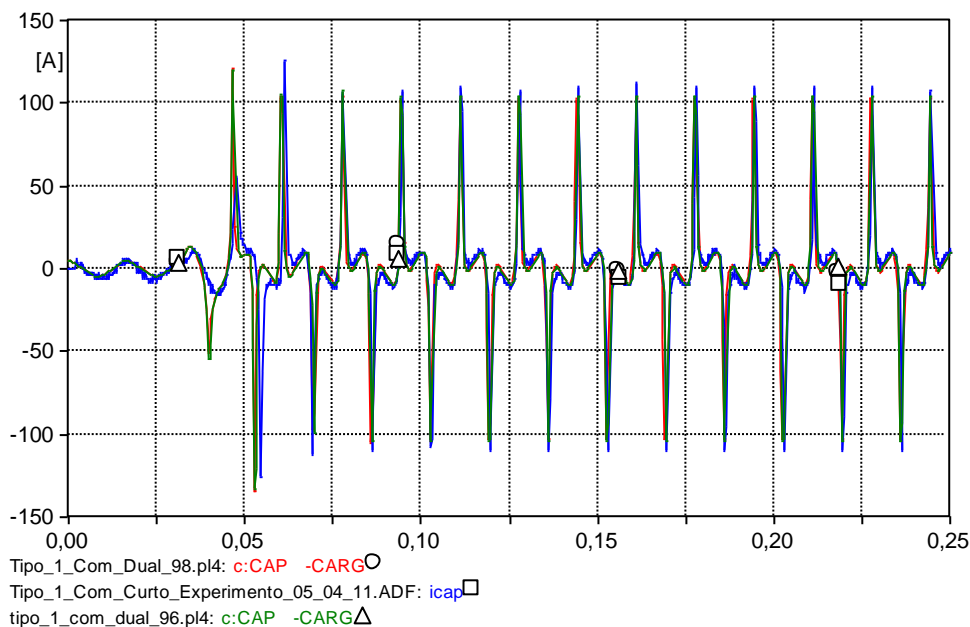


**Figura 4.28** – Forma de onda da tensão no BCS e RNS para a Estrutura Assimétrica com dualidade eletromagnética. Type 98 (○), Type 96 (△) e Experimento (□).

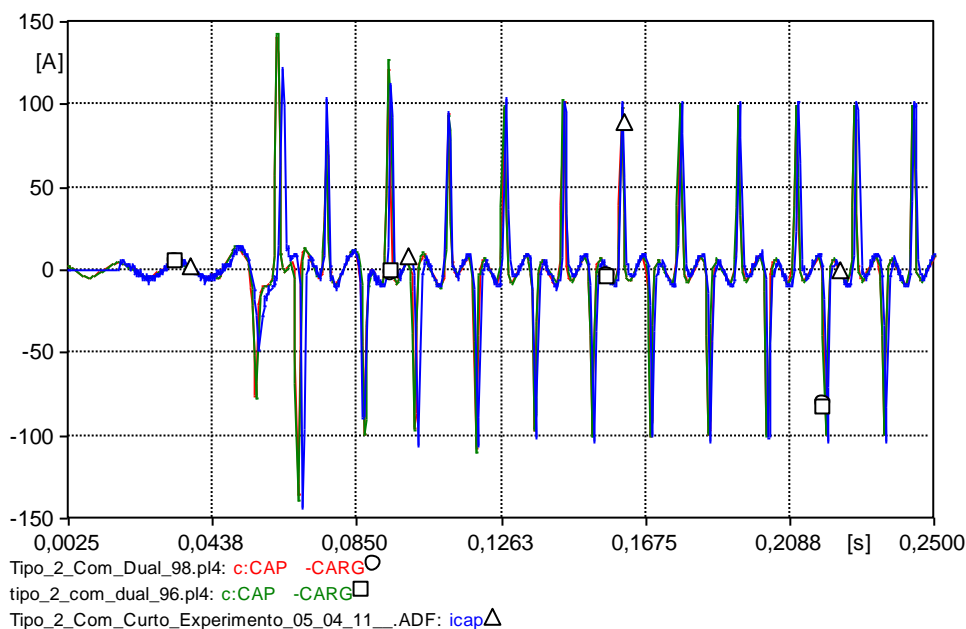


**Figura 4.29** – Forma de onda da tensão no BCS e RNS para a Estrutura Simétrica com dualidade eletromagnética. Type 98 (○), Type 96 (△) e Experimento (□).

As Figuras 4.30 e 4.31 mostram a forma de onda da corrente no BCS para a Estrutura Assimétrica e Estrutura Simétrica, respectivamente.

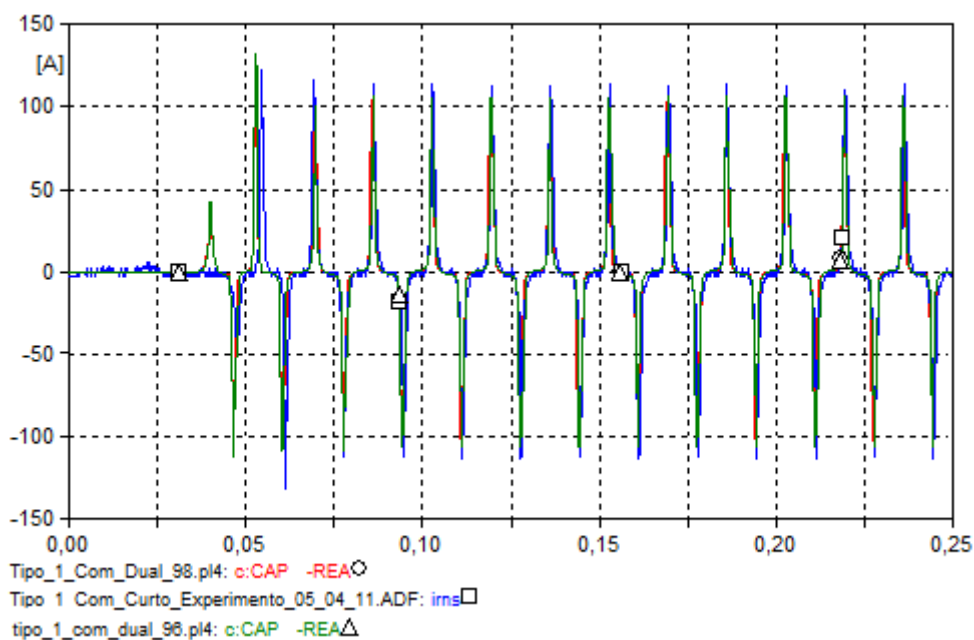


**Figura 4.30** – Forma de onda da corrente no BCS para a Estrutura Assimétrica com dualidade eletromagnética. Type 98 (○), Type 96 (△) e Experimento (□).

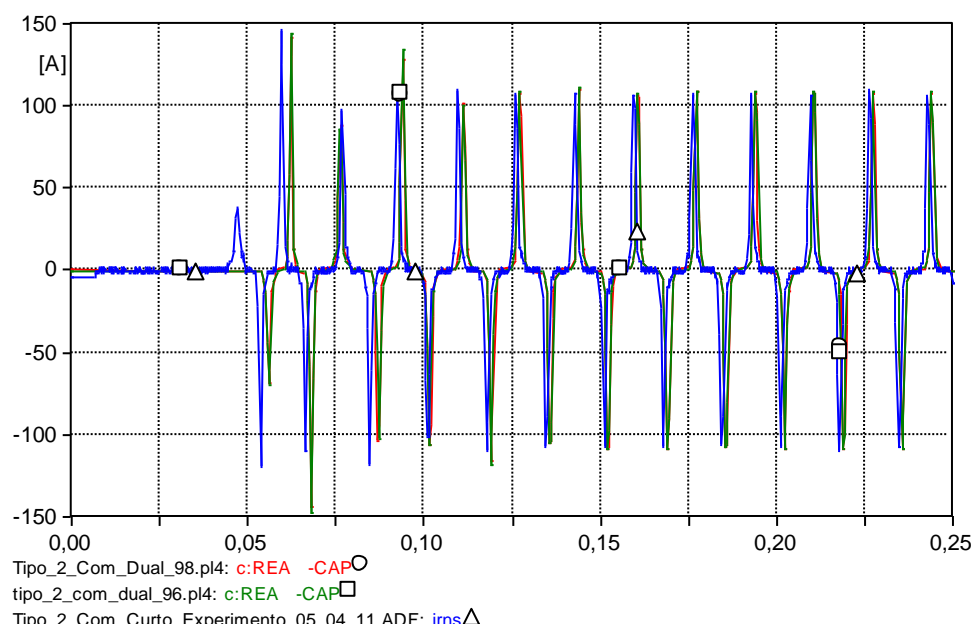


**Figura 4.31** – Forma de onda da corrente no BCS para a Estrutura Simétrica com dualidade eletromagnética. Type 98 (○), Type 96 (△) e Experimento (□).

As Figuras 4.32 e 4.33 mostram a forma de onda da corrente no RNS para a Estrutura Assimétrica e Estrutura Simétrica, respectivamente.



**Figura 4.32** – Forma de onda da corrente no RNS para a Estrutura Assimétrica com dualidade eletromagnética. Type 98 (○), Type 96 (△) e Experimento (□).



**Figura 4.33** – Forma de onda da corrente no RNS para a Estrutura Simétrica com dualidade eletromagnética. Type 98 (○), Type 96 (△) e Experimento (□).

A Tabela 4.3 mostra os valores de corrente e de tensão do sistema obtidos em simulação e experimento.

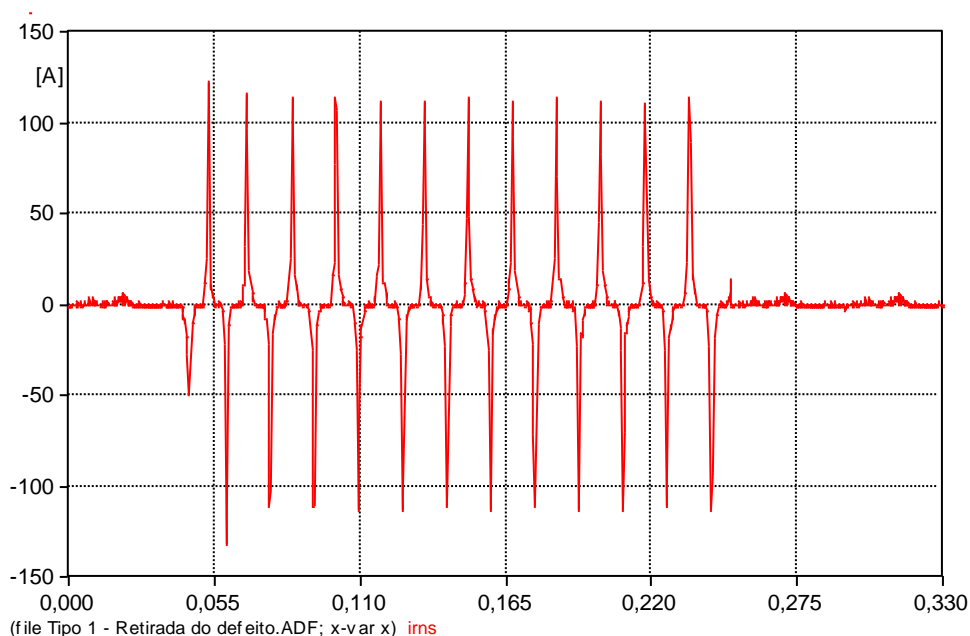
**Tabela 4.3** – *Comparação dos resultados experimentados e simulados com dualidade eletromagnética.*

<b><u>Regime Permanente</u></b>						
	<b>Experimento</b>		<b>Simulação</b>			
	<b>Assimétrica</b>	<b>Simétrica</b>	<b>TYPE 98</b>		<b>TYPE 96</b>	
			<b>Assimétrica</b>	<b>Simétrica</b>	<b>Assimétrica</b>	<b>Simétrica</b>
<b><math>I_{Carga}</math> (<math>A_{RMS}</math>)</b>	3,3	3,2	3,1	3,1	3,1	3,1
<b><math>V_{Carga}</math> (<math>V_{RMS}</math>)</b>	222,0	223,3	220,7	220,4	219,6	219,5
<b><math>V_{BCS}</math> (<math>V_{RMS}</math>)</b>	14,7	14,8	14,2	14,2	14,9	14,5
<b><math>I_{BCS}</math> (<math>A_{RMS}</math>)</b>	3,3	3,2	3,1	3,1	3,1	3,1
<b><math>I_{RNS}</math> (<math>A_{RMS}</math>)</b>	-	-	-	-	-	-
<b><u>Transitório</u></b>						
	<b>Experimento</b>		<b>Simulação</b>			
	<b>Assimétrica</b>	<b>Simétrica</b>	<b>TYPE 98</b>		<b>TYPE 96</b>	
			<b>Assimétrica</b>	<b>Simétrica</b>	<b>Assimétrica</b>	<b>Simétrica</b>
<b><math>I_{Carga}</math> (<math>A_{PICO}</math>)</b>	15,2	14,4	13,7	14,4	13,5	13,9
<b><math>V_{Carga}</math> (<math>V_{PICO}</math>)</b>	248	252	256	255,2	254,2	256,9
<b><math>V_{BCS}</math> (<math>V_{PICO}</math>)</b>	139,2	140,8	141,5	143	139,8	146,0
<b><math>I_{BCS}</math> (<math>A_{PICO}</math>)</b>	126	144	120,5	140,5	132,5	139,3
<b><math>I_{RNS}</math> (<math>A_{PICO}</math>)</b>	116	120	132,3	144,2	132,2	144,1
<b><u>Durante um curto - circuito</u></b>						
	<b>Experimento</b>		<b>Simulação</b>			
	<b>Assimétrica</b>	<b>Simétrica</b>	<b>TYPE 98</b>		<b>TYPE 96</b>	
			<b>Assimétrica</b>	<b>Simétrica</b>	<b>Assimétrica</b>	<b>Simétrica</b>
<b><math>I_{Carga}</math> (<math>A_{RMS}</math>)</b>	7,9	7,9	7,2	7,3	7,2	7,5
<b><math>V_{Carga}</math> (<math>V_{RMS}</math>)</b>	147,1	135,8	140,0	140,7	139,6	141,5
<b><math>V_{BCS}</math> (<math>V_{PICO}</math>)</b>	85,9	78,1	77,1	73,8	78,4	73,4
<b><math>I_{BCS}</math> (<math>A_{PICO}</math>)</b>	76,4	72,1	72,7	70,2	73,7	70,4
<b><math>I_{RNS}</math> (<math>A_{PICO}</math>)</b>	80,6	77,9	72,2	76,7	75,1	76,8

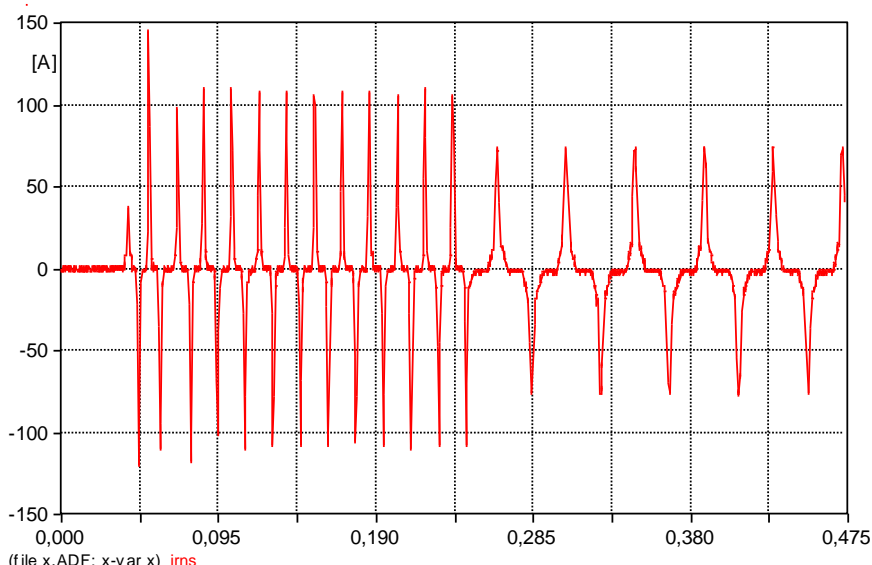
#### 4.6 – Análise do ARMTRS após a remoção do defeito

Como foi visto na seção 2.3.3 do capítulo 2, a resistência de amortecimento tem influência decisiva no desempenho do RNS após a eliminação do defeito sem o desligamento da fonte. Foram feitos experimentos com o sistema teste da Figura 4.2 em regime normal de operação, com o sistema sob a influência de um curto circuito e com a retirada desse defeito. Observou-se nos experimentos que depois da retirada do defeito o RNS da Estrutura Assimétrica saiu de seu estado de saturação, enquanto o RNS da Estrutura Simétrica permaneceu no seu estado de saturação, devido à troca de energia entre o BCS e o RNS.

A Figura 4.34 mostra a forma de onda da corrente no reator naturalmente saturado da Estrutura Assimétrica no instante que precede o defeito, durante o defeito e logo após esse defeito ser extinguido. Já a Figura 4.35 mostra a forma de onda da corrente no RNS da Estrutura Simétrica.

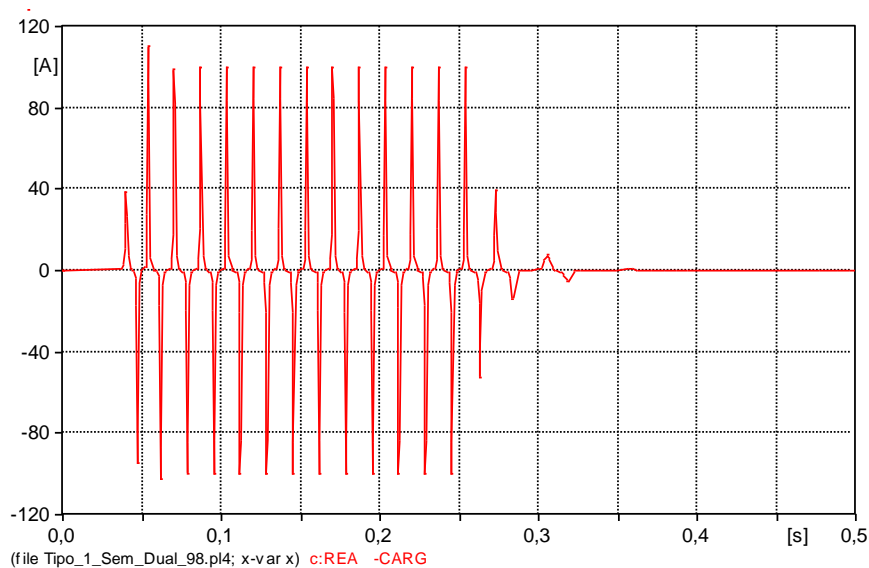


**Figura 4.34** – Forma de onda da corrente no RNS para a Estrutura Assimétrica antes, durante e depois da retirada de um defeito – Resultado experimental.

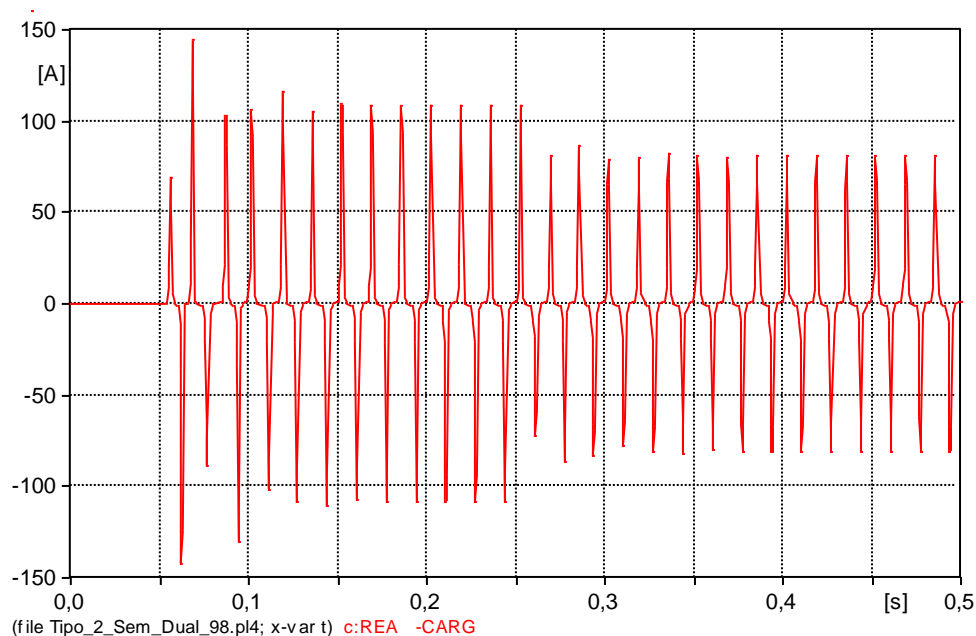


**Figura 4.35** – Forma de onda da corrente no RNS para a Estrutura Simétrica antes, durante e depois da retirada de um defeito – Resultado experimental.

Esse comportamento distinto das estruturas depois da remoção do curto é causado pela resistência próprias das bobinas dos RNS's. A Estrutura Assimétrica possui uma resistência de  $0,3\Omega$  que é suficiente para dissipar a troca de energia entre o RNS e o BCS exercendo, assim, função de uma resistência de amortecimento. Já a Estrutura Simétrica possui uma resistência de  $0,07\Omega$  o que é insuficiente para dissipar a troca dessa energia e resultando na não dessaturação do RNS depois da retirada do defeito (o ensaio para a obtenção dessas resistências pode ser visto no Anexo 7.9). Esse mesmo fenômeno foi verificado nas simulações como mostra as Figuras 4.36 e 4.37.



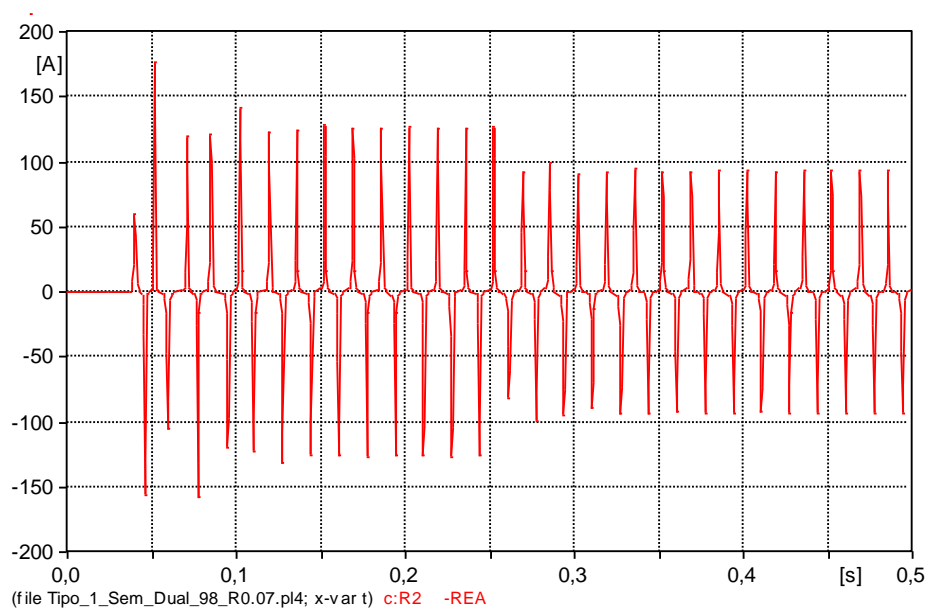
**Figura 4.36** – Forma de onda da corrente no RNS para a Estrutura Assimétrica antes, durante e depois da retirada de um defeito – Resultado de Simulação.



**Figura 4.37** – Forma de onda da corrente no RNS para a Estrutura Simétrica antes, durante e depois da retirada de um defeito – Resultado de Simulação.

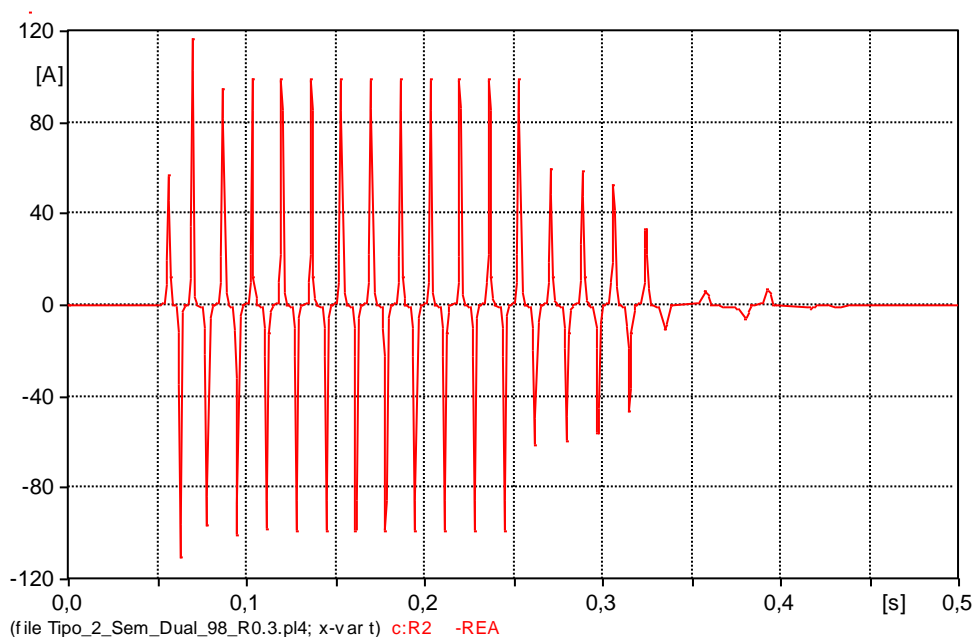
Com o intuito de comprovar que esse fenômeno ocorre devido ao fator de qualidade das bobinas, ou seja, a relação entre a reatância e a resistência, o valor das resistências próprias das bobinas das duas estruturas foi trocado.

A Figura 4.38 mostra a forma de onda do RNS para Estrutura Assimétrica com a resistência própria da bobina da Estrutura Simétrica.



**Figura 4.38** – Forma de onda da corrente no RNS para a Estrutura Assimétrica com a bobina própria da Estrutura Simétrica. Antes, durante e depois da retirada de um defeito – Resultado de Simulação.

A Figura 4.39 mostra a forma de onda do RNS para Estrutura Simétrica com a resistência própria da bobina da Estrutura Assimétrica.



**Figura 4.39** – Forma de onda da corrente no RNS para a Estrutura Simétrica com a bobina própria da Estrutura Assimétrica. Antes, durante e depois da retirada de um defeito – Resultado de Simulação.

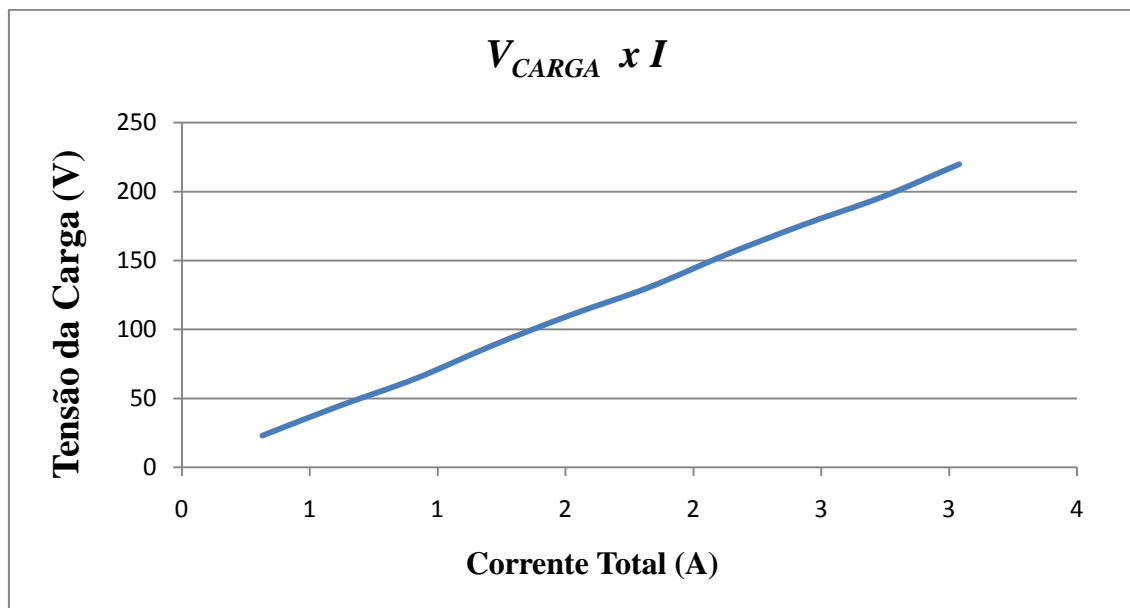
Os resultados obtidos e mostrado nas Figuras 4.38 e 4.39 comprovam que esse fenômeno é provocado devido ao fator de qualidade dessas bobinas.

#### 4.7 – Auto-ajuste da tensão do ARMTRS

O efeito da auto-regulação da tensão do ARMTRS pode ser observado na Figura 4.40, onde foi traçado a curva característica  $V \times I$  para a tensão medida na carga a jusante do ARMTRS e a corrente medida a montante do mesmo, conforme esquema de ligação apresentada na Figura 4.2.

À medida que a corrente cresce, a tensão na carga também cresce. Verificando-se o efeito da auto-regulação da tensão do ARMTRS. As medições para esse ensaio pode ser visto no Anexo 7.13.





**Figura 4.40** – Curva  $V \times I$  sob a carga a jusante do ARMTRS.

## 4.8 – Resultados obtidos através do programa FEMM

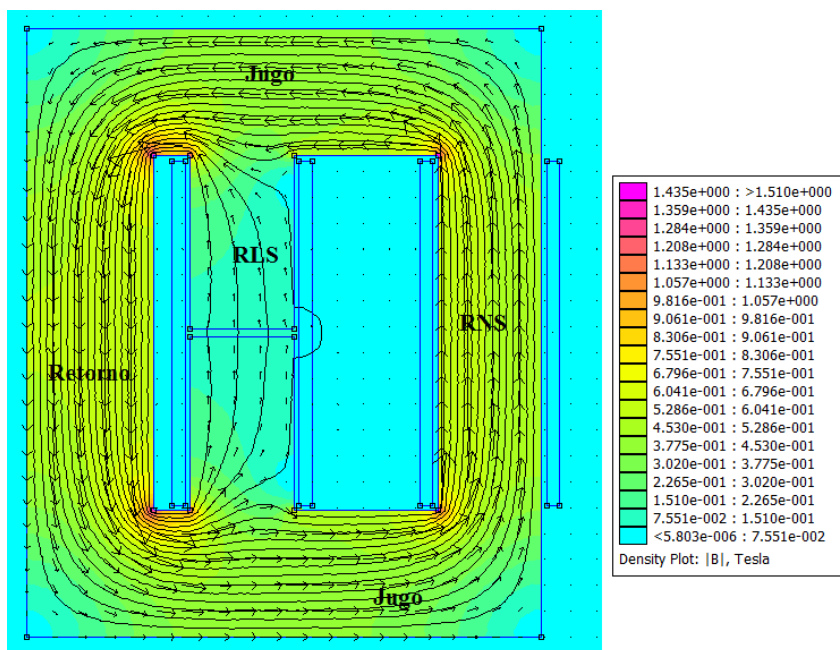
O FEMM (Finite Element Method Magnetics) é um programa que calcula os campos elétricos e magnéticos de uma estrutura utilizando o método de elementos finitos. Este programa é utilizado para a visualização das linhas de fluxo nos protótipos projetados, de modo que se possa averiguar se os resultados obtidos em projetos são próximos dos esperados na prática.

O ARMTRS modelado no FEMM é simulado utilizando os mesmos valores de projeto quanto às dimensões físicas do protótipo e suas características. Ambas as estruturas foram simuladas tanto em regime permanente quanto sob influencia de um defeito.

### 4.8.1 – Regime Permanente

As estruturas eletromagnéticas do ARMTRS foram simuladas nas condições de regime permanente, caso em que toda a corrente circula praticamente pela bobina linear (RLS), pois, nesse momento a bobina de núcleo saturado (RNS) está operando na região de não saturação. Os valores das correntes são de 0,2 A na bobina com núcleo saturado e de 3,0 A na bobina linear.

A Figura 4.41 mostra as linhas de fluxo e suas direções resultantes da simulação da estrutura ferromagnética do ARMTRS, utilizando as dimensões de projeto, e a Figura 4.42 (b) mostra os valores obtidos para a indução magnética (B) em Tesla e do campo magnético (H) em A/m para a Estrutura Assimétrica.



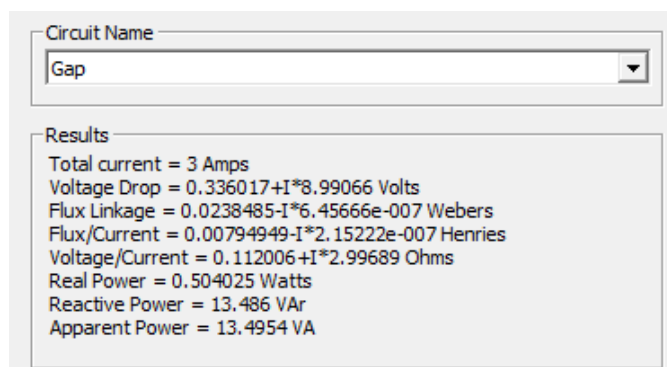
**Figura 4.41** – Linhas de fluxo da Estrutura Assimétrica após simulação em regime permanente.

Point: x=2.2, y=12.4 A = 0.00320505-I*6.87862e-007 Wb/m  B  = 0.539221 T Bx = -0.00271144-I*1.22706e-007 T By = -0.539214+I*1.33498e-006 T  H  = 38.7124 A/m Hx = -0.194663-I*8.80948e-006 A/m Hy = -38.7119+I*9.58426e-005 A/m mu_x = 11084.3 (rel) mu_y = 11084.3 (rel) J = 0 MA/m <sup>2</sup>	<b>Retorno</b>	Point: x=8.1, y=12.5 A = 0.0154593-I*6.59322e-007 Wb/m  B  = 0.127524 T Bx = -0.00149853-I*7.61697e-007 T By = 0.127515-I*1.22071e-006 T  H  = 11.9081 A/m Hx = -0.139931-I*7.11266e-005 A/m Hy = 11.9072-I*0.000113989 A/m mu_x = 8521.99 (rel) mu_y = 8521.99 (rel) J = 0 MA/m <sup>2</sup>	<b>RLS</b>
Point: x=17.3, y=12.6 A = 0.00493115-I*6.14901e-007 Wb/m  B  = 0.529972 T Bx = -0.00207437+I*2.17393e-008 T By = 0.529968+I*1.52934e-006 T  H  = 38.1911 A/m Hx = -0.149484+I*1.56658e-006 A/m Hy = 38.1908+I*0.000110208 A/m mu_x = 11042.9 (rel) mu_y = 11042.9 (rel) J = 0 MA/m <sup>2</sup>	<b>RNS</b>	Point: x=10, y=21.5 A = -0.000266845-I*6.45283e-007 Wb/m  B  = 0.417004 T Bx = -0.416958-I*6.69524e-007 T By = 0.00623977-I*7.88206e-007 T  H  = 31.7922 A/m Hx = -31.7887-I*5.10442e-005 A/m Hy = 0.475718-I*6.00925e-005 A/m mu_x = 10437.8 (rel) mu_y = 10437.8 (rel) J = 0 MA/m <sup>2</sup>	<b>Jugo</b>

**Figura 4.42** – Valores de indução magnética obtidos através do FEMM para a Estrutura Assimétrica em regime permanente.

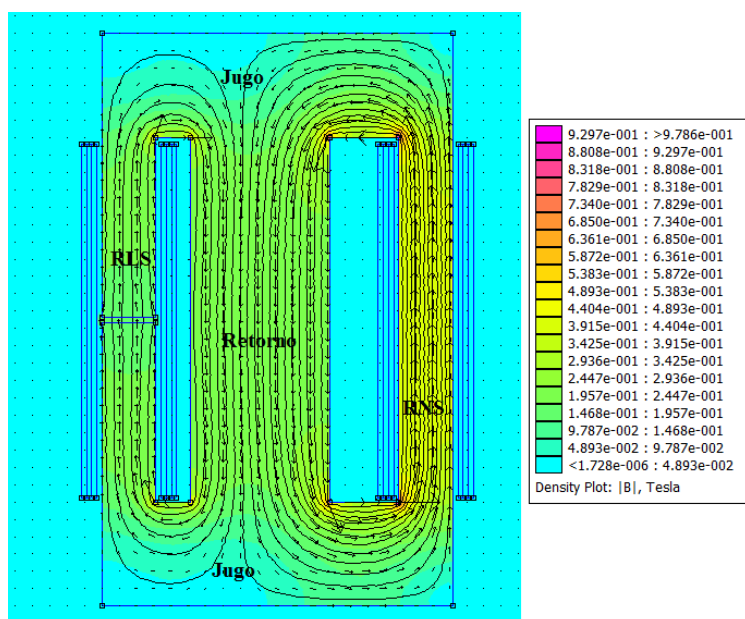
De acordo com a Figura 4.42, os valores de indução magnética para o Retorno, RLS, RNS e Jugo são 0,539T, 0,127T, 0,523T e 0,417T, respectivamente. Conforme esperado, o RNS não está na sua região de saturação em regime permanente, pois o RNS começa a saturar para uma indução acima de 0,937T.

A Figura 4.43 mostra os valores de corrente, tensão, fluxo, indutância, potência reativa e aparente para a bobina linear. Conforme Simulação do FEMM, obteve-se uma indutância ( $L_{Gap}$ ) igual a 0.0079H, o que resulta em uma reatância ( $X_{Gap}$ ) igual a 3,00  $\Omega$ . Essa reatância é próxima da reatância calculada para a bobina linear do protótipo que é de 3,2  $\Omega$ .



**Figura 4.43** – Resultados de Simulação obtidos através do FEMM para a Estrutura Assimétrica em regime permanente.

A Figura 4.44 mostra as linhas de fluxo e suas direções resultantes da simulação da estrutura ferromagnética do ARMTRS, utilizando as dimensões de projeto, e a Figura 4.45 mostra os valores obtidos para a indução magnética (B) em Tesla e do campo magnético (H) em A/m para a Estrutura Simétrica.



**Figura 4.44** – Linhas de fluxo da Estrutura Simétrica após simulação em regime permanente.

Point: x=1.4, y=17.3 A = -0.00453604+I*1.44691e-006 Wb/m  B  = 0.174526 T Bx = 0.00128069-I*7.42054e-007 T By = 0.174521-I*2.88816e-005 T  H  = 15.7502 A/m Hx = 0.115576-I*6.6967e-005 A/m Hy = 15.7498-I*0.00260643 A/m mu_x= 8817.89 (rel) mu_y= 8817.89 (rel) J= 0 MA/m <sup>2</sup>	<b>RLS</b>	Point: x=9.1, y=17.1 A = 0.0013249+I*1.89969e-006 Wb/m  B  = 0.229369 T Bx = -0.000714352+I*1.10719e-006 T By = -0.229368+I*2.60479e-005 T  H  = 19.862 A/m Hx = -0.0618589+I*9.58761e-005 A/m Hy = -19.8619+I*0.0022556 A/m mu_x= 9189.68 (rel) mu_y= 9189.68 (rel) J= 0 MA/m <sup>2</sup>	<b>Retorno</b>
Point: x=18.6, y=17.6 A = 0.00462033+I*3.95914e-007 Wb/m  B  = 0.398143 T Bx = -3.2058e-005+I*6.97427e-009 T By = 0.398143+I*2.41704e-005 T  H  = 30.6947 A/m Hx = -0.0024715+I*5.37679e-007 A/m Hy = 30.6947+I*0.00186341 A/m mu_x= 10322 (rel) mu_y= 10322 (rel) J= 0 MA/m <sup>2</sup>	<b>RNS</b>	Point: x=8.3, y=3.9 A = -0.00112664+I*1.3192e-006 Wb/m  B  = 0.102098 T Bx = 0.0078499+I*3.39148e-005 T By = -0.101796+I*2.02784e-005 T  H  = 9.6915 A/m Hx = 0.74514+I*0.00321931 A/m Hy = -9.66281+I*0.0019249 A/m mu_x= 8383.33 (rel) mu_y= 8383.33 (rel) J= 0 MA/m <sup>2</sup>	<b>Jugo</b>

**Figura 4.45** – Valores de indução magnética obtidos através do FEMM para a Estrutura Simétrica em regime permanente.

De acordo com a Figura 4.45 os valores de indução magnética para o RLS, Retorno, RNS e jugo são 0,174T, 0,229T, 0,398T e 0,102T, respectivamente. Conforme esperado, o RNS não está na sua região de saturação em regime permanente, pois o RNS começa a saturar para uma indução acima de 0,937T.

A Figura 4.46 mostra os valores de corrente, tensão, fluxo, indutância, potência reativa e aparente para a bobina linear. Conforme Simulação do FEMM, obteve-se uma indutância ( $L_{Gap}$ ) igual a 0.0085H, o que resulta em uma reatância ( $X_{Gap}$ ) igual a 3,2  $\Omega$ . Essa reatância é próxima da reatância calculada para a bobina linear do protótipo que é de 3,5  $\Omega$ .

Circuit Name

GAP

---

Results

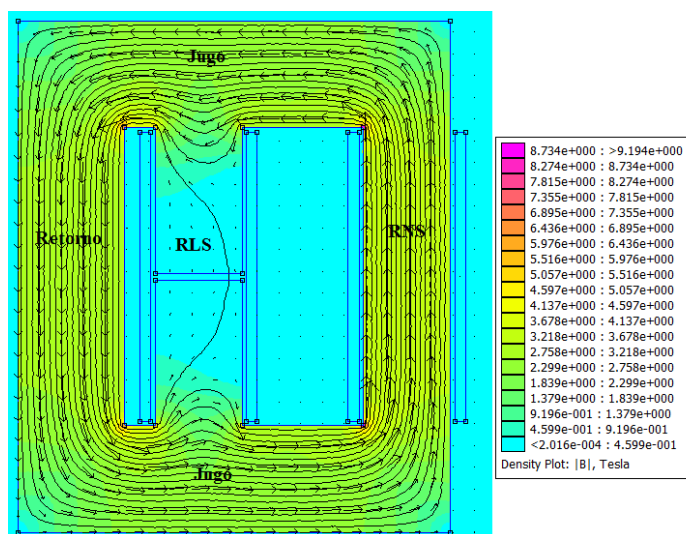
Total current = 3 Amps  
 Voltage Drop = 0.0651522+I\*9.6144 Volts  
 Flux Linkage = 0.025503-I\*1.40184e-005 Webers  
 Flux/Current = 0.008501-I\*4.6728e-006 Henries  
 Voltage/Current = 0.0217174+I\*3.2048 Ohms  
 Real Power = 0.0977283 Watts  
 Reactive Power = 14.4216 VAR  
 Apparent Power = 14.4219 VA

**Figura 4.46** – Resultados de Simulação obtidos através do FEMM para a Estrutura Simétrica em regime permanente.

#### 4.8.2 –Durante um defeito

As estruturas eletromagnéticas do ARMTRS também foram simuladas sob a ocorrência de um defeito, nesse momento a bobina de núcleo saturado (RNS) está operando na região de saturação. O valor da corrente de curto é de aproximadamente de  $8 A_{RMS}$ .

A Figura 4.47 mostra as linhas de fluxo e suas direções resultantes da simulação da estrutura ferromagnética do ARMTRS, utilizando as dimensões de projeto, e a Figura 4.48 mostra os valores obtidos para a indução magnética (B) em Tesla e do campo magnético (H) em A/m para a Estrutura Assimétrica.



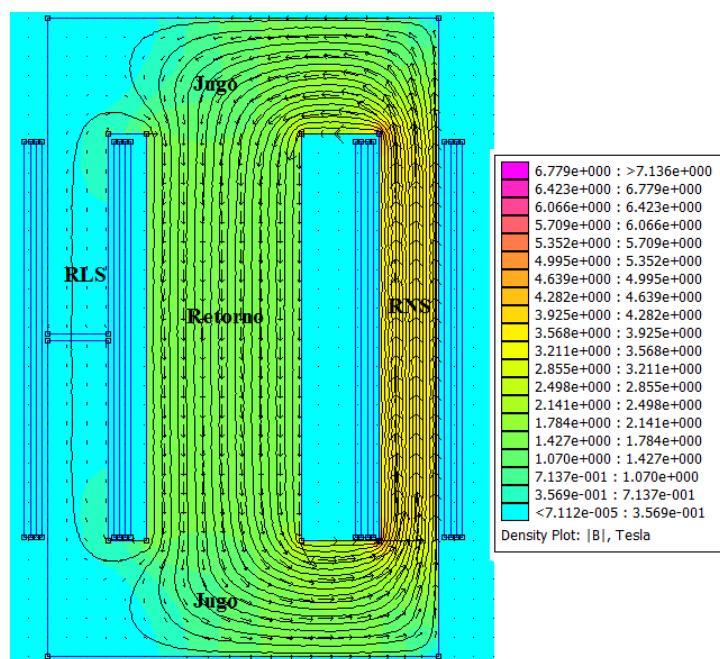
**Figura 4.47** – Linhas de fluxo da Estrutura Assimétrica após simulação durante um defeito.

Point: x=2.5, y=12.5 A = 0.0220614-I*3.94587e-006 Wb/m  B  = 2.86402 T Bx = -0.00153999-I*2.42499e-007 T By = -2.86402-I*2.00715e-006 T  H  = 1327.12 A/m Hx = -0.715995-I*0.000112268 A/m Hy = -1327.12-I*0.000930066 A/m mu_x = 1717.34 (rel) mu_y = 1717.34 (rel) J = 0 MA/m <sup>2</sup>	<b>Retorno</b>	Point: x=8.1, y=12.9 A = 0.0865462-I*3.90098e-006 Wb/m  B  = 0.220486 T Bx = -0.0373723-I*7.9106e-007 T By = 0.217295-I*2.96525e-006 T  H  = 19.2206 A/m Hx = -3.2579-I*6.89599e-005 A/m Hy = 18.9425-I*0.000258493 A/m mu_x = 9128.58 (rel) mu_y = 9128.58 (rel) J = 0 MA/m <sup>2</sup>	<b>RLS</b>
Point: x=17.7, y=11.3 A = 0.0208457-I*3.82347e-006 Wb/m  B  = 3.36789 T Bx = 0.00080116+I*2.05913e-009 T By = 3.36789+I*1.09745e-006 T  H  = 1746.91 A/m Hx = 0.415558+I*1.06806e-006 A/m Hy = 1746.91+I*0.000569241 A/m mu_x = 1534.19 (rel) mu_y = 1534.19 (rel) J = 0 MA/m <sup>2</sup>	<b>RNS</b>	Point: x=7.9, y=3.8 A = 0.0399571-I*3.92458e-006 Wb/m  B  = 2.14946 T Bx = 2.07955-I*1.53732e-006 T By = 0.543744-I*4.54153e-006 T  H  = 731.807 A/m Hx = 708.005-I*0.000523397 A/m Hy = 185.123-I*0.00154621 A/m mu_x = 2337.35 (rel) mu_y = 2337.35 (rel) J = 0 MA/m <sup>2</sup>	<b>Jugo</b>

**Figura 4.48** – Valores de indução magnética obtidos através do FEMM para a Estrutura Assimétrica durante um defeito.

De acordo com a Figura 4.48 os valores de indução magnética para o Retorno, RLS, RNS e jugo são 2,86T, 0,22T, 3,37T e 2,157T, respectivamente. Conforme esperado, o RNS está na sua região de saturação durante um defeito, pois o RNS começa a saturar para uma indução acima de 0,937T.

A Figura 4.49 mostra as linhas de fluxo e suas direções resultantes da simulação da estrutura ferromagnética do ARMTRS, utilizando as dimensões de projeto, e a Figura 4.50 mostra os valores obtidos para a indução magnética (B) em Tesla e do campo magnético (H) em A/m para a Estrutura Simétrica.



**Figura 4.49** – Linhas de fluxo da Estrutura Simétrica após simulação durante um defeito.

Point: x=0,7, y=18.7 A = -0.0345846-I*5.21791e-006 Wb/m  B  = 0.442469 T Bx = 0.00977654-I*3.23978e-005 T By = 0.442361-I*0.000187686 T  H  = 33.2541 A/m Hx = 0.734764-I*0.00243488 A/m Hy = 33.246-I*0.0141057 A/m mu_x = 10588.3 (rel) mu_y = 10588.3 (rel) J = 0 MA/m <sup>2</sup>	<b>RLS</b>	Point: x=8,4, y=18.4 A = 0.0242436-I*2.69513e-006 Wb/m  B  = 2.10375 T Bx = -0.00847641+I*1.22447e-005 T By = -2.10373+I*6.76197e-005 T  H  = 693.721 A/m Hx = -2.79514+I*0.00403775 A/m Hy = -693.716+I*0.0222979 A/m mu_x = 2413.23 (rel) mu_y = 2413.23 (rel) J = 0 MA/m <sup>2</sup>	<b>Retorno</b>
Point: x=18,2, y=19.3 A = 0.0519409-I*5.20255e-006 Wb/m  B  = 3.86067 T Bx = -0.000318048+I*5.64736e-007 T By = 3.86067+I*9.13398e-006 T  H  = 2157.46 A/m Hx = -0.177734+I*0.000315591 A/m Hy = 2157.46+I*0.00510433 A/m mu_x = 1424 (rel) mu_y = 1424 (rel) J = 0 MA/m <sup>2</sup>	<b>RNS</b>	Point: x=12,8, y=30.2 A = 0.0258183-I*5.0796e-006 Wb/m  B  = 1.85414 T Bx = -1.83268-I*1.41395e-005 T By = -0.281273+I*7.66446e-006 T  H  = 486.63 A/m Hx = -480.998-I*0.00371098 A/m Hy = -73.8217+I*0.00201158 A/m mu_x = 3032.04 (rel) mu_y = 3032.04 (rel) J = 0 MA/m <sup>2</sup>	<b>Jugo</b>

**Figura 4.50** – Valores de indução magnética obtidos através do FEMM para a Estrutura Simétrica durante um defeito.

De acordo com a Figura 4.50, os valores de indução magnética para o RLS, Retorno, RNS e jugo são 0,44T, 2,10T, 3,86T e 1,85T, respectivamente. Conforme esperado, o RNS está na sua região de saturação durante um defeito, pois o RNS começa a saturar para uma indução acima de 0,937T.

## **CAPITULO 5**

### **CONSIDERAÇÕES FINAIS**

#### **5.1 – Conclusão**

As considerações expostas nesse trabalho apontam as dimensões e o peso do ARMTRS como elementos restritivos para a aplicação desse dispositivo nos moldes propostos, ou seja, instalados em plena via pública. Sob esse enfoque, a conjugação do RLS e do RNS numa estrutura eletromagnética única parece, numa análise expedita, uma proposta atraente, pois se espera, nesse caso, uma redução dos parâmetros de interesse. Apesar de o peso da estrutura ferromagnética para o alimentador de ITA-03 ser quase o dobro da estrutura para o alimentador de SLM-01C3 exposta no capítulo 3, ainda assim é inferior se comparado ao peso de somente um regulador monofásico que é de 1650 kg [21], equivalente a um pouco mais do que o dobro do peso de uma unidade monofásica do ARMTRS. Além da vantagem em relação ao peso, o ARMTRS além de regular a tensão na barra de carga mais distantes do alimentador, ainda tem como benefício adicional a limitação da corrente de curto-circuito e o controle do afundamento e elevação da tensão a montante do equipamento durante um defeito se comparado aos reguladores de tensão que se limita apenas a regular a tensão a jusante.

O dimensionamento do ARMTRS foi realizado considerando todos os componentes que compõe esse equipamento, no que tange à mudança da arquitetura, a modelagem do ARMTRS continuou sendo realizada considerando-se as características de seus componentes básicos os quais fazem parte o RNS, RLS, BCS e a resistência de amortecimento. Foram abrangidas propostas distintas para dois alimentadores com características diversificadas e em princípio, ambas as opções apresentadas são perfeitamente factíveis, cada uma apresentando atributos favoráveis, mas também oferecendo determinados inconvenientes para a aplicação pretendida.

As análises do ARMTRS para sistemas elétricos trifásicos de distribuição, apresentadas neste trabalho, reforçam as vantagens da utilização do equipamento em regime permanente de operação, tendo em vista os resultados obtidos para a regulação das tensões nas barras localizadas depois dele. Durante a operação em regime transitório, nos casos de curto-circuito, a corrente foi desviada do banco de capacitores série, circulando pelo reator saturado. Nessas condições, verificou-se que mesmo depois da remoção do

defeito o reator saturado continuou operando em sua região de saturação. Contudo, esse fenômeno foi eliminado com a utilização de resistência de amortecimento, conforme mostrado no capítulo 2 o que evidencia o papel decisivo dessa resistência na dessaturação do RNS.

No que se refere ao BCS o uso de células padrão tem em consideração o fato que a fabricação de unidades especiais mesmo que não representem um custo elevado será um empecilho a sua aplicação. O seu uso que não seja em grande número enfrentará dificuldades, pois os fabricantes dificilmente se disporão a enfrentar o desafio uma vez que as quantidades encomendadas não justificariam uma adaptação no processo de fabricação. As células padrão de 400kvar e 300kvar, por exemplo, tem reatâncias consideráveis o que demanda não só o uso de várias células capacitivas como também sejam compensadas com grandes reatores lineares para que o processo de auto-regulação seja atingido.

A metodologia inovadora proposta para o projeto do ARMTRS requer, como é de praxe em todo processo de pesquisa, uma apurada verificação em laboratório que ratifique ou mesmo aponte eventuais desvios nos procedimentos estabelecidos nos estudos prévios. Com esse intuito, protótipos em tamanho reduzido de ambas as estruturas ferromagnéticas (assimétrica e simétrica) foram construídas e testadas em laboratório. No entanto, o tipo de estrutura a ser utilizada na rede CELPE, ou seja, a disposição do núcleo de retorno central ou em um dos extremos da unidade, dependerá da economicidade do projeto e da interação com o fabricante quanto a melhor forma e experiência construtiva disponíveis para a fabricação da estrutura. Os dados obtidos em laboratório mostram que o uso do ARMTRS em um sistema elétrico não compromete seu desempenho em regime permanente e nem sob a ocorrência de um defeito. Quando acontece um curto-circuito próximo à carga, o fenômeno transitório produz um perfil de corrente e tensão típicos para reatores não-lineares e os valores registrados não revelam maiores preocupações para com os níveis atingidos. Observou-se que por meios dos dados experimentais foi possível ressaltar a eficiência operacional do ARMTRS quanto ao processo da regulação da tensão.

Tendo em vista todos os resultados exposto neste trabalho remata-se que o ARMTRS é uma alternativa bastante viável e promissora para a regulação de tensão e apresenta outras vantagens se comparado ao uso de reguladores de tensão contribuindo, assim, para a qualidade do suprimento de energia elétrica.



## 5.2 – Sugestões para trabalhos futuros

Seguem algumas sugestões para trabalho futuros com a finalidade de aprimoramento para a utilização do ARMTRS.

- Desenvolver o dimensionamento do ARMTRS utilizando a tecnologia do ferro amorfo;
- Desenvolver pesquisas visando a utilização de filtros com o intuito de reduzir as variações brusca de tensão na rede devido a presença do RLS em algumas arquitetura do ARMTRS;
- Estender a pesquisa para a aplicação do ARMTRS para sistemas de transmissão partindo do 69kV e 230kV que com o crescimento da rede básica atenderá cargas radialmente com topologia típica dos alimentadores de distribuição atual.

## 5.3 – Publicações

- M. A. Carvalho Jr., A. G. de Souza , L. A. M. da Fonte, L. H. Nery, M. M. da Silva, F. E. F. Freitas, J. D. B. Vilar, W.B Santos, S. F. da Silva, S. M. Ferreira, “Dados experimentais de um Auto-Regulador Magnético de Tensão para Redes Primárias de Distribuição a Reator Saturado”, IX CBQEE – 2011.

## APÊNDICE

### 6.1 – Configuração do sistema teste – SLM-01C3

**Tabela 6.1 – Características do Sistema de distribuição – 13,8kV – SLM-01C3.**

<i>Dados do Sistema Elétrico</i>						
<b>Tensão Equivalente do Sistema (V)</b>				11.537,00		
<b>Impedância Reduzida do Sistema (<math>\Omega</math>)</b>				0,1809 + j1,455		
<b>Dados da Rede (Modelo <math>\pi</math> Equivalente)</b>						
<b>1. Condutor 95mm<sup>2</sup> Cu</b>						
<b>I<sub>ADM</sub> (A)</b>	<b>GMR</b>	<b>R (<math>\Omega</math>)</b>	<b>R<sub>0</sub> (<math>\Omega</math>)</b>	<b>X<sub>0</sub> (<math>\Omega</math>)</b>	<b>R<sub>1</sub> (<math>\Omega</math>)</b>	<b>X<sub>1</sub> (<math>\Omega</math>)</b>
<b>430,00</b>	0,04750	0,23460	0,91220	2,07020	0,23460	0,42510
<b>2. Condutor 4/0 CAA Al</b>						
<b>I<sub>ADM</sub> (A)</b>	<b>GMR</b>	<b>R (<math>\Omega</math>)</b>	<b>R<sub>0</sub> (<math>\Omega</math>)</b>	<b>X<sub>0</sub> (<math>\Omega</math>)</b>	<b>R<sub>1</sub> (<math>\Omega</math>)</b>	<b>X<sub>1</sub> (<math>\Omega</math>)</b>
<b>340,00</b>	0,04750	0,36790	0,54560	1,93450	0,36790	0,47160
<b>3. Condutor 2/0 CAA Al</b>						
<b>I<sub>ADM</sub> (A)</b>	<b>GMR</b>	<b>R (<math>\Omega</math>)</b>	<b>R<sub>0</sub> (<math>\Omega</math>)</b>	<b>X<sub>0</sub> (<math>\Omega</math>)</b>	<b>R<sub>1</sub> (<math>\Omega</math>)</b>	<b>X<sub>1</sub> (<math>\Omega</math>)</b>
<b>270,00</b>	0,03500	0,55610	0,73390	1,19720	0,55610	0,50910
<b>4. Condutor 1/0 CAA Al</b>						
<b>I<sub>ADM</sub> (A)</b>	<b>GMR</b>	<b>R (<math>\Omega</math>)</b>	<b>R<sub>0</sub> (<math>\Omega</math>)</b>	<b>X<sub>0</sub> (<math>\Omega</math>)</b>	<b>R<sub>1</sub> (<math>\Omega</math>)</b>	<b>X<sub>1</sub> (<math>\Omega</math>)</b>
<b>230,00</b>	0,02500	0,69610	0,87370	1,98110	0,69610	0,51820
<b>5. Condutor 4 CAA Al</b>						
<b>I<sub>ADM</sub> (A)</b>	<b>GMR</b>	<b>R (<math>\Omega</math>)</b>	<b>R<sub>0</sub> (<math>\Omega</math>)</b>	<b>X<sub>0</sub> (<math>\Omega</math>)</b>	<b>R<sub>1</sub> (<math>\Omega</math>)</b>	<b>X<sub>1</sub> (<math>\Omega</math>)</b>
<b>140,00</b>	0,01250	1,59700	1,77470	1,98300	1,59700	0,52000
<b>Dados das Cargas</b>						
<b>Barra</b>	<b>Fase A</b>		<b>Fase B</b>		<b>Fase C</b>	
	<b>R (<math>\Omega</math>)</b>	<b>X(<math>\Omega</math>)</b>	<b>R (<math>\Omega</math>)</b>	<b>X(<math>\Omega</math>)</b>	<b>R (<math>\Omega</math>)</b>	<b>X(<math>\Omega</math>)</b>
<b>3</b>	1327,7	562,8	1264,4	536,0	1201,2	509,2
<b>4</b>	2112,7	895,6	2012,1	853,0	1911,5	810,3

<b>5</b>	5195,2	2202,3	4947,8	2097,4	4700,4	1992,6
<b>7</b>	6719,1	2848,3	6399,1	2712,7	6079,2	2577,0
<b>9</b>	211,6	89,7	201,5	85,4	191,4	81,2
<b>11</b>	3344,1	1417,6	3184,9	1350,1	3025,7	1282,6

## 6.2 – Roteiro em ATP do sistema SLM-01C3 sem ARMTRS

```

BEGIN NEW DATA CASE
C -----
C Generated by ATPDRAW junho, terça-feira 14, 2011
C A Bonneville Power Administration program
C by H. K. Høidalen at SEFAS/NTNU - NORWAY 1994-2006
C -----
ALLOW EVEN PLOT FREQUENCY
C ***** Sistema SLM-01C3 trifásico sem ARMTRS *****
C dT << Tmax >> Xopt << Copt >
6.667E-7      2.      60.      60.
      300      50      1      1      1      0      0      1      0
C      1      2      3      4      5      6      7      8
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
/BRANCH
C < n1 >< n2 ><ref1><ref2>< R >< L >< C >
C < n1 >< n2 ><ref1><ref2>< R >< A >< B ><Leng><><>0
C -----
C ***** Impedância de Thévenin *****
FONTEAP0A      .1809 1.455      0
FONTEBP0B      .1809 1.455      0
FONTECP0C      .1809 1.455      0
C -----
C ***** Cabo 95mm2 Cu (0,643 km) *****
-1B1A  B2A      .58651.3311      .8      1. 0 0      0
-2B1B  B2B      .1508 .2733      2.1      1. 0 0      0
-3B1C  B2C      .1508 .2733      2.1      1. 0 0      0
C -----
C ***** Cabo 95mm2 Cu (1,084 km) *****
-1B2A  B4A      .9888 2.244      .8      1. 0 0      0
-2B2B  B4B      .2543 .4608      2.1      1. 0 0      0
-3B2C  B4C      .2543 .4608      2.1      1. 0 0      0
C -----
C ***** Cabo 4/0 CAA Al Cu (1,666 km) *****
-1B4A  B5A      .9093.2229      .8      1. 0 0      0
-2B4B  B5B      .6129 .7857      2.      1. 0 0      0
-3B4C  B5C      .6129 .7857      2.      1. 0 0      0
C -----
C ***** Cabo 2/0 CAA Al Cu (0,236 km) *****
-1B5A  B6_1A      .1732 .2825      .8      1. 0 0      0
-2B5B  B6_1B      1.21671.1139      2.      1. 0 0      0
-3B5C  B6_1C      1.21671.1139      2.      1. 0 0      0
C -----
C ***** Cabo 2/0 CAA Al Cu (0,457 km) *****
-1B6_2A B7A      .3354 .5471      .8      1. 0 0      0
-2B6_2B B7B      .2541 .2327      2.      1. 0 0      0
-3B6_2C B7C      .2541 .2327      2.      1. 0 0      0
C -----
C ***** Cabo 1/0 CAA Al Cu (0,440 km) *****
-1B7A  B8A      .3844 .8717      .8      1. 0 0      0
-2B7B  B8B      .3063 .228      2.      1. 0 0      0
-3B7C  B8C      .3063 .228      2.      1. 0 0      0
C -----
C ***** Carga na Barra 11 *****
C11A      3344.1      0

```

C11B		3184.9				0
C11C		3025.7				0
C11A		1403.				0
C11B		1350.1				0
C11C		1282.6				0
C	-----					
C	***** Defeito na Barra 11 *****					
B11A	CURTOA	1.				1
B11B	CURTOB	1.				1
B11C	CURTOC	1.				1
C	-----					
C	***** Cabo 1/0 CAA Al Cu (0,324 km) *****					
-1B8A	B10A	.2988	.6775	.8	1. 0 0	0
-2B8B	B10B	.2381	.1772	2.	1. 0 0	0
-3B8C	B10C					0
C	-----					
C	***** Cabo 4/0 CAA Al Cu (3,690 km) *****					
-1B10A	B11A	6.54867	.3173	.8	1. 0 0	0
-2B10B	B11B	5.89291	.9188	2.	1. 0 0	0
-3B10C	B11C					0
C	-----					
C	***** Cabo 4/0 CAA Al Cu (0,750 km) *****					
-1B8A	B9A	1.3311	.4872	.8	1. 0 0	0
-2B8B	B9B	1.1976	.39	2.	1. 0 0	0
-3B8C	B9C					0
C	-----					
C	***** Cabo 95mm2 Cu (1,346 km) *****					
-1B2A	B3A	1.22782	.7865	.8	1. 0 0	0
-2B2B	B3B	.3158	.5722	2.1	1. 0 0	0
-3B2C	B3C					0
C	-----					
C	***** Carga na Barra 3 *****					
C3A		1327.6				0
C3B		1264.4				0
C3C		1201.2				0
C3A		562.8				0
C3B		536.				0
C3C		509.2				0
C	-----					
C	***** Carga na Barra 4 *****					
C4A		2112.7				0
C4B		2012.1				0
C4C		1911.5				0
C4A		895.6				0
C4B		852.9				0
C4C		810.3				0
C	-----					
C	***** Carga na Barra 5 *****					
C5A		5195.2				0
C5B		4947.8				0
C5C		4700.4				0
C5A		2202.3				0
C5B		2097.4				0
C5C		1992.5				0
C	-----					
C	***** Carga na Barra 9 *****					
C9A		212.1				0
C9B		202.				0
C9C		191.9				0
C9A		89.7				0
C9B		85.4				0
C9C		81.1				0
C	-----					
C	***** Carga na Barra 7 *****					
C7A		6719.1				0
C7B		6399.1				0
C7C		6079.1				0

```

C7A                2848.3                0
C7B                2712.7                0
C7C                2577.1                0
C -----
C ***** Chaves do circuito *****
/SWITCH
C < n 1>< n 2>< Tclose ><Top/Tde >< Ie ><Vf/CLOP >< type >
C ***** Chave da Barra 1 *****
P0A  B1A          .01    10.                1
P0B  B1B          .01    10.                1
P0C  B1C          .01    10.                1
C ***** Chave da Carga 3 *****
B3A  C3A         -1.    10.                1
B3B  C3B         -1.    10.                1
B3C  C3C         -1.    10.                1
C ***** Chave onde será colocado o ARMTRS *****
B6_1A B6_2A       -1.    10.                1
B6_1B B6_2B       -1.    10.                1
B6_1C B6_2C       -1.    10.                1
C ***** Chave do Defeito *****
CURTOA          1.    15.                1
CURTOB          15.   15.                0
CURTOC          15.   15.                0
C ***** Chave da Carga 9 *****
B9A  C9A         -1.    10.                1
B9B  C9B         -1.    10.                1
B9C  C9C         -1.    10.                1
C ***** Chave da Carga 11 *****
B11A C11A        -1.    10.                1
B11B C11B        -1.    10.                1
B11C C11C        -1.    10.                1
C ***** Chave da Carga 7 *****
B7A  C7A         -1.    10.                1
B7B  C7B         -1.    10.                1
B7C  C7C         -1.    10.                1
C ***** Chave da Carga 5 *****
B5A  C5A         -1.    10.                1
B5B  C5B         -1.    10.                1
B5C  C5C         -1.    10.                1
C ***** Chave da Carga 4 *****
B4A  C4A         -1.    10.                1
B4B  C4B         -1.    10.                1
B4C  C4C         -1.    10.                1
C -----
C ***** Tensão - Equivalente de Thévenin *****
/SOURCE
C < n 1><>< Ampl. >< Freq. ><Phase/T0>< A1 >< T1 >< TSTART >< TSTOP >
14FONTEA 0      11537.    60.                -1.    5.
14FONTEB 0      11537.    60.   -120.        -1.    5.
14FONTEC 0      11537.    60.    120.        -1.    5.
/OUTPUT
  B1A  B1B  B1C  B4A  B4B  B4C  B5A  B5B  B5C  B6_1A B6_1B B6_1C B7A
  B7B  B7C  B11A B11B B11C B3A  B3B  B3C  B10A B10B B10C B9A  B9B
  B9C  B2A  B2B  B2C  B8A  B8B  B8C
BLANK BRANCH
BLANK SWITCH
BLANK SOURCE
BLANK OUTPUT
BLANK PLOT
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK

```

### 6.3 – Configuração do sistema teste – ITA-03

**Tabela 6.2 – Características do Sistema de distribuição – 13,8kV – ITA-03.**

<b>Dados do Sistema Elétrico</b>						
<b>Tensão Equivalente do Sistema (V)</b>				11.664,55		
<b>Impedância Reduzida do Sistema (<math>\Omega</math>)</b>				0,3245 +j2,2927		
<b>Dados da Rede (Modelo <math>\pi</math> Equivalente)</b>						
<b>1. Condutor 2/0 CAA Al</b>						
<b>I<sub>ADM</sub> (A)</b>	<b>GMR</b>	<b>R (<math>\Omega</math>)</b>	<b>R<sub>0</sub> (<math>\Omega</math>)</b>	<b>X<sub>0</sub> (<math>\Omega</math>)</b>	<b>R<sub>1</sub> (<math>\Omega</math>)</b>	<b>X<sub>1</sub> (<math>\Omega</math>)</b>
<b>270,00</b>	0,03500	0,55610	0,73390	1,19720	0,55610	0,50910
<b>2. Condutor 1/0 CAA Al</b>						
<b>I<sub>ADM</sub> (A)</b>	<b>GMR</b>	<b>R (<math>\Omega</math>)</b>	<b>R<sub>0</sub> (<math>\Omega</math>)</b>	<b>X<sub>0</sub> (<math>\Omega</math>)</b>	<b>R<sub>1</sub> (<math>\Omega</math>)</b>	<b>X<sub>1</sub> (<math>\Omega</math>)</b>
<b>230,00</b>	0,02500	0,69610	0,87370	1,98110	0,69610	0,51820
<b>3. Condutor 35mm<sup>2</sup> Al</b>						
<b>I<sub>ADM</sub> (A)</b>	<b>GMR</b>	<b>R (<math>\Omega</math>)</b>	<b>R<sub>0</sub> (<math>\Omega</math>)</b>	<b>X<sub>0</sub> (<math>\Omega</math>)</b>	<b>R<sub>1</sub> (<math>\Omega</math>)</b>	<b>X<sub>1</sub> (<math>\Omega</math>)</b>
<b>168</b>	0,01750	1,11300	1,29080	2,72030	1,1300	0,32120
<b>Dados das cargas</b>						
<b>Barra</b>	<b>Fase A</b>		<b>Fase B</b>		<b>Fase C</b>	
	<b>R (<math>\Omega</math>)</b>	<b>X(<math>\Omega</math>)</b>	<b>R (<math>\Omega</math>)</b>	<b>X(<math>\Omega</math>)</b>	<b>R (<math>\Omega</math>)</b>	<b>X(<math>\Omega</math>)</b>
<b>2</b>	923,6	391,5	879,6	372,9	835,6	354,2
<b>4</b>	1598,5	677,6	1522,4	645,4	1446,3	613,1
<b>5</b>	725,7	307,6	691,1	293,0	656,6	278,3
<b>7</b>	1339,2	567,7	1275,4	540,7	1211,7	513,6
<b>8</b>	754,9	320,0	718,9	304,8	683,0	289,5
<b>9</b>	1635,5	693,3	1557,6	660,3	1479,8	627,3
<b>10</b>	1962,6	832,0	1869,2	792,4	1775,7	752,7

### 6.4 – Roteiro em ATP do sistema ITA-03 sem ARMTRS

```

BEGIN NEW DATA CASE
C -----
C Generated by ATPDRAW outubro, sábado 29, 2011
C A Bonneville Power Administration program
C by H. K. Høidalen at SEFAS/NTNU - NORWAY 1994-2006
C -----
ALLOW EVEN PLOT FREQUENCY
C dT >> Tmax >> Xopt >> Copt >
6.667E-7 1. 60. 60.
300 50 1 1 1 0 0 1 0
C 1 2 3 4 5 6 7 8
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
/BRANCH

```



```

C9C          1479.8          0
C9A          693.31         0
C9B          660.3          0
C9C          627.29         0
C10A         1962.6         0
C10B         1869.2         0
C10C         1775.7         0
C10A         831.98         0
C10B         792.36         0
C10C         752.74         0
/SWITCH
C < n 1><< n 2>> Tclose ><Top/Tde >< Ie ><Vf/CLOP >< type >
P0A  B1A      .01      10.      1
P0B  B1B      .01      10.      1
P0C  B1C      .01      10.      1
CURTOA      1.      15.      0
CURTOB     15.      15.      0
CURTOC     15.      15.      0
B2A  C2A     -1.      10.      1
B2B  C2B     -1.      10.      1
B2C  C2C     -1.      10.      1
B4A  C4A     -1.      10.      1
B4B  C4B     -1.      10.      1
B4C  C4C     -1.      10.      1
B5A  C5A     -1.      10.      1
B5B  C5B     -1.      10.      1
B5C  C5C     -1.      10.      1
B7_2A C7A     -1.      10.      1
B7_2B C7B     -1.      10.      1
B7_2C C7C     -1.      10.      1
B8A  C8A     -1.      10.      1
B8B  C8B     -1.      10.      1
B8C  C8C     -1.      10.      1
B9A  C9A     -1.      10.      1
B9B  C9B     -1.      10.      1
B9C  C9C     -1.      10.      1
B10A C10A     -1.      10.      1
B10B C10B     -1.      10.      1
B10C C10C     -1.      10.      1
B6A  B7_1A   -1.      10.      1
B6B  B7_1B   -1.      10.      1
B6C  B7_1C   -1.      10.      1
/SOURCE
C < n 1><<< Ampl. >< Freq. ><Phase/T0>< A1 >< T1 >< TSTART >< TSTOP >
14FONTEA 0 11644.556      60.      -1.      5.
14FONTEB 0 11644.556      60.     -120.   -1.      5.
14FONTEC 0 11644.556      60.      120.   -1.      5.
/OUTPUT
  B1A  B1B  B1C  B3A  B3B  B3C  B2A  B2B  B2C  B5A  B5B  B5C  B4A
  B4B  B4C  B7_2A B7_2B B7_2C B6A  B6B  B6C  B9A  B9B  B9C  B8A  B8B
  B8C  B10A B10B B10C
BLANK BRANCH
BLANK SWITCH
BLANK SOURCE
BLANK OUTPUT
BLANK PLOT
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK

```



## 6.5 - Roteiro em ATP do sistema SLM-01C3 com ARMTRS

```

BEGIN NEW DATA CASE
C -----
C Generated by ATPDRAW setembro, terça-feira 27, 2011
C A Bonneville Power Administration program
C by H. K. Høidalen at SEFAS/NTNU - NORWAY 1994-2006
C -----
ALLOW EVEN PLOT FREQUENCY
C ***** Sistema SLM-01C3 Trifásico com ARMTRS *****
C dT >< Tmax >< Xopt >< Copt >
6.667E-7      3.      60.      60.
      300      50      1      1      1      0      0      1      0
C      1      2      3      4      5      6      7      8
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
/BRANCH
C < n1 >< n2 ><ref1><ref2>< R >< L >< C >
C < n1 >< n2 ><ref1><ref2>< R >< A >< B ><Leng><><>0
C -----
C ***** Impedância de Thévenin *****
FONTEAP0A      .1809 1.455      0
FONTEBP0B      .1809 1.455      0
FONTECP0C      .1809 1.455      0
C -----
C ***** Cabo 95mm2 Cu (0,643 km) *****
-1B1A  B2A      .58651.3311      .8      1. 0 0      0
-2B1B  B2B      .1508 .2733      2.1      1. 0 0      0
-3B1C  B2C      .1508 .2733      2.1      1. 0 0      0
C -----
C ***** Cabo 95mm2 Cu (1,084 km) *****
-1B2A  B4A      .9888 2.244      .8      1. 0 0      0
-2B2B  B4B      .2543 .4608      2.1      1. 0 0      0
-3B2C  B4C      .2543 .4608      2.1      1. 0 0      0
C -----
C ***** Cabo 4/0 CAA Al Cu (1,666 km) *****
-1B4A  B5A      .9093.2229      .8      1. 0 0      0
-2B4B  B5B      .6129 .7857      2.      1. 0 0      0
-3B4C  B5C      .6129 .7857      2.      1. 0 0      0
C -----
C ***** Cabo 2/0 CAA Al Cu (0,236 km) *****
-1B5A  B6A      .1732 .2825      .8      1. 0 0      0
-2B5B  B6B      1.21671.1139      2.      1. 0 0      0
-3B5C  B6C      1.21671.1139      2.      1. 0 0      0
C -----
C ***** Cabo 2/0 CAA Al Cu (0,457 km) *****
-1CAP2A B7A      .3354 .5471      .8      1. 0 0      0
-2CAP2B B7B      .2541 .2327      2.      1. 0 0      0
-3CAP2C B7C      .2541 .2327      2.      1. 0 0      0
C -----
C ***** Cabo 1/0 CAA Al Cu (0,440 km) *****
-1B7A  B8A      .3844 .8717      .8      1. 0 0      0
-2B7B  B8B      .3063 .228      2.      1. 0 0      0
-3B7C  B8C      .3063 .228      2.      1. 0 0      0
C -----
C ***** Cabo 1/0 CAA Al Cu (0,324 km) *****
-1B8A  B10A      .2988 .6775      .8      1. 0 0      0
-2B8B  B10B      .2381 .1772      2.      1. 0 0      0
-3B8C  B10C      .2381 .1772      2.      1. 0 0      0
C -----
C ***** Cabo 4/0 CAA Al Cu (3,690 km) *****
-1B10A B11A      6.54867.3173      .8      1. 0 0      0
-2B10B B11B      5.89291.9188      2.      1. 0 0      0
-3B10C B11C      5.89291.9188      2.      1. 0 0      0

```

```

C -----
C ***** Cabo 4/0 CAA Al Cu (0,750 km) *****
-1B8A  B9A          1.3311.4872  .8  1. 0 0          0
-2B8B  B9B          1.1976  .39  2.  1. 0 0          0
-3B8C  B9C
C -----
C ***** Cabo 95mm2 Cu (1,346 km) *****
-1B2A  B3A          1.22782.7865  .8  1. 0 0          0
-2B2B  B3B          .3158 .5722  2.1  1. 0 0          0
-3B2C  B3C
C -----
C ***** Carga na Barra 3 *****
C3A          1327.6          0
C3B          1264.4          0
C3C          1201.2          0
C3A          562.8          0
C3B          536.          0
C3C          509.2          0
C -----
C ***** Carga na Barra 4 *****
C4A          2112.7          0
C4B          2012.1          0
C4C          1911.5          0
C4A          895.6          0
C4B          852.9          0
C4C          840.3          0
C -----
C ***** Carga na Barra 5 *****
C5A          5195.2          0
C5B          4947.8          0
C5C          4700.4          0
C5A          2202.3          0
C5B          2097.4          0
C5C          1992.5          0
C -----
C ***** Carga na Barra 9 *****
C9A          212.1          0
C9B          202.          0
C9C          191.9          0
C9A          89.7          0
C9B          85.4          0
C9C          81.1          0
C -----
C ***** Carga na Barra 7 *****
C7A          6719.1          0
C7B          6399.1          0
C7C          6079.1          0
C7A          2848.3          0
C7B          2712.7          0
C7C          2577.1          0
C -----
C ***** Carga na Barra 11 *****
C11A         3344.1          0
C11B         3184.9          0
C11C         3025.7          0
C11A         1403.          0
C11B         1336.1          0
C11C         1269.3          0
C -----
C ***** Resistência de amortecimento 1 (cobre) - Reator Linear 1 *****
B6A  IND1_A          0.11          0
B6B  IND1_B          0.11          0
B6C  IND1_C          0.11          0
C -----
C ***** Resistência de amortecimento 2 (cobre) - Reator Linear 2 *****
RES_A IND2_A          0.01          0
RES_B IND2_B          0.01          0

```

RES_C	IND2_C	0.01	0
-----			
C	***** Reator Linear 1 - Limitador da Corrente de Curto-circuito *****		
IND1	ARES_A	3.0	3
IND1	BRES_B	3.0	3
IND1	CRES_C	3.0	3
-----			
C	***** Reator Linear 2 *****		
IND2	ACAP1_A	3.5	0
IND2	BCAP1_B	3.5	0
IND2	CCAP1_C	3.5	0
-----			
C	***** BCS *****		
CAP1	ACAP2A	69348.	3
CAP1	BCAP2B	69348.	3
CAP1	CCAP2C	69348.	3
-----			
C	***** Defeito na Barra 11 *****		
B11A	CURTOA	1.	1
B11B	CURTOB	1.	0
B11C	CURTOC	1.	0
-----			
C	***** Resistência entre chaves *****		
CHRC	CACHCCA	.01	0
CHRC	BCHCCB	.01	0
CHRC	CCHCCC	.01	0
-----			
C	***** Resistência de amortecimento (cobre) - Reator Saturado *****		
RES_A	REA_A	10.	3
RES_B	REA_B	10.	0
RES_C	REA_C	10.	0
-----			
C	***** Reator Saturado Fase A *****		
98REA_A	CAP2A	0.0 0.0	3
	0.0658	1.7107	
	0.0750	2.1384	
	0.0847	2.5661	
	0.0943	2.9938	
	0.1031	3.4214	
	0.1119	3.8491	
	0.1167	4.2768	
	0.1206	4.4906	
	0.1259	4.7045	
	0.1303	4.9183	
	0.1378	5.1322	
	0.1457	5.3460	
	0.1553	5.5598	
	0.1689	5.7737	
	0.1821	5.9875	
	0.2053	6.2014	
	0.2369	6.4152	
	0.2523	6.5007	
	0.2698	6.5863	
	0.2939	6.6718	
	0.3246	6.7573	
	0.3641	6.8429	
	0.4212	6.9284	
	0.4738	7.0140	
	0.5703	7.0995	
	0.6581	7.1850	
	0.8116	7.2706	
	0.8994	7.3133	
	0.9871	7.3561	
	1.1187	7.3989	
	1.2503	7.4416	
	1.4302	7.4844	
	1.5574	7.5272	

1.8426	7.5699
2.0839	7.6127
2.4568	7.6555
2.7639	7.6982
3.3781	7.7410
3.8607	7.7838
4.6065	7.8265
5.2646	7.8693
6.1421	7.9121
6.5808	7.9548
7.6776	7.9976
8.7744	8.0404
13.7827	8.2115
27.5655	8.3825
55.1310	8.4253

9999

```

C -----
C ***** Reator Saturado Fase B *****
98REA_B CAP2B          0.0  0.0          1
  0.0658      1.7107
  0.0750      2.1384
  0.0847      2.5661
  0.0943      2.9938
  0.1031      3.4214
  0.1119      3.8491
  0.1167      4.2768
  0.1206      4.4906
  0.1259      4.7045
  0.1303      4.9183
  0.1378      5.1322
  0.1457      5.3460
  0.1553      5.5598
  0.1689      5.7737
  0.1821      5.9875
  0.2053      6.2014
  0.2369      6.4152
  0.2523      6.5007
  0.2698      6.5863
  0.2939      6.6718
  0.3246      6.7573
  0.3641      6.8429
  0.4212      6.9284
  0.4738      7.0140
  0.5703      7.0995
  0.6581      7.1850
  0.8116      7.2706
  0.8994      7.3133
  0.9871      7.3561
  1.1187      7.3989
  1.2503      7.4416
  1.4302      7.4844
  1.5574      7.5272
  1.8426      7.5699
  2.0839      7.6127
  2.4568      7.6555
  2.7639      7.6982
  3.3781      7.7410
  3.8607      7.7838
  4.6065      7.8265
  5.2646      7.8693
  6.1421      7.9121
  6.5808      7.9548
  7.6776      7.9976
  8.7744      8.0404
  13.7827     8.2115
  27.5655     8.3825
  55.1310     8.4253

```

```

          9999
C -----
C ***** Reator Saturado Fase C *****
98REA_C CAP2C          0.0  0.0          1
  0.0658      1.7107
  0.0750      2.1384
  0.0847      2.5661
  0.0943      2.9938
  0.1031      3.4214
  0.1119      3.8491
  0.1167      4.2768
  0.1206      4.4906
  0.1259      4.7045
  0.1303      4.9183
  0.1378      5.1322
  0.1457      5.3460
  0.1553      5.5598
  0.1689      5.7737
  0.1821      5.9875
  0.2053      6.2014
  0.2369      6.4152
  0.2523      6.5007
  0.2698      6.5863
  0.2939      6.6718
  0.3246      6.7573
  0.3641      6.8429
  0.4212      6.9284
  0.4738      7.0140
  0.5703      7.0995
  0.6581      7.1850
  0.8116      7.2706
  0.8994      7.3133
  0.9871      7.3561
  1.1187      7.3989
  1.2503      7.4416
  1.4302      7.4844
  1.5574      7.5272
  1.8426      7.5699
  2.0839      7.6127
  2.4568      7.6555
  2.7639      7.6982
  3.3781      7.7410
  3.8607      7.7838
  4.6065      7.8265
  5.2646      7.8693
  6.1421      7.9121
  6.5808      7.9548
  7.6776      7.9976
  8.7744      8.0404
 13.7827      8.2115
 27.5655      8.3825
 55.1310      8.4253
          9999
C -----
C ***** Chaves do circuito *****
/SWITCH
C < n 1>< n 2>< Tclose ><Top/Tde >< Ie ><Vf/CLOP >< type >
C ***** Chave da Barra 1 *****
P0A  B1A          -1.      10.          0
P0B  B1B          -1.      10.          0
P0C  B1C          -1.      10.          0
C ***** Chave da Carga 3 *****
B3A  C3A          -1.      10.          0
B3B  C3B          -1.      10.          0
B3C  C3C          -1.      10.          0
C ***** Chave da Carga 9 *****
B9A  C9A          -1.      10.          0

```

```

B9B C9B -1. 10. 0
B9C C9C -1. 10. 0
C ***** Chave da Carga 11 *****
B11A C11A -1. 10. 0
B11B C11B -1. 10. 0
B11C C11C -1. 10. 0
C ***** Chave da Carga 7 *****
B7A C7A -1. 10. 0
B7B C7B -1. 10. 0
B7C C7C -1. 10. 0
C ***** Chave da Carga 5 *****
B5A C5A -1. 10. 0
B5B C5B -1. 10. 0
B5C C5C -1. 10. 0
C ***** Chave da Carga 4 *****
B4A C4A -1. 10. 0
B4B C4B -1. 10. 0
B4C C4C -1. 10. 0
C ***** Chave paralela aos RNS *****
RES_A CAP2A 10. 1.E3 0
RES_B CAP2B 10. 1.E3 0
RES_C CAP2C 10. 1.E3 0
C ***** Chave de Retirada do Defeito *****
CURTOACHRCCA -1. 2.2 0
C CURTOACHRCCA -1. .233333 0
C CURTOACHRCCA -1. 15. 0
CURTOBCHRCCB -1. 15. 0
CURTOCCHRCCC -1. 15. 0
C ***** Chave do Defeito *****
CHCCA 1.2 15. 1
CHCCB 15. 15. 0
CHCCC 15. 15. 0
C -----
C ***** Tensão - Equivalente de Thévenin *****
/SOURCE
C < n 1><> Ampl. >< Freq. ><Phase/T0>< A1 >< T1 >< TSTART >< TSTOP >
14FONTEA 0 11537. 60. -1. 5.
14FONTEB 0 11537. 60. -120. -1. 5.
14FONTEC 0 11537. 60. 120. -1. 5.
/OUTPUT
B1A B1B B1C B4A B4B B4C B5A B5B B5C B6A B6B B6C B7A
B7B B7C B11A B11B B11C CAP2B CAP1_BRES_B CAP2C CAP1_CB3A B3B B3C
B10A B10B B10C B9A B9B B9C CAP2A CAP1_ARES_A RES_C B2A B2B B2C
B8A B8B B8C
BLANK BRANCH
BLANK SWITCH
BLANK SOURCE
BLANK OUTPUT
BLANK PLOT
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK

```

## 6.6 – Roteiro em ATP do sistema ITA-03 com ARMTRS

```

BEGIN NEW DATA CASE
C -----
C Generated by ATPDRAW novembro, quinta-feira 3, 2011
C A Bonneville Power Administration program
C by H. K. Høidalen at SEFAS/NTNU - NORWAY 1994-2006
C -----
ALLOW EVEN PLOT FREQUENCY
C dT >< Tmax >< Xopt >< Copt >
6.667E-7 3. 60. 60.
300 50 1 1 1 0 0 1 0
C 1 2 3 4 5 6 7 8

```

```

C 3456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
/BRANCH
C < n1 >> n2 >>ref1><ref2>< R >> L >> C >
C < n1 >> n2 >>ref1><ref2>< R >> A >> B >><Leng><><>0
C -----
C ***** Impedância de Thévenin *****
FONTEAP0A .32452.2927 0
FONTEBP0B .32452.2927 0
FONTECP0C .32452.2927 0
C -----
C ***** Cabo 2/0 CAA (1,0 km) *****
-1B1A B2A .7342.0095 .8 1.0 0 0
-2B1B B2B .5563 .4902 2.1 1.0 0 0
-3B1C B2C 0
C -----
C ***** Cabo 2/0 CAA (0,4 km) *****
-1B2A B3A .7342.0095 .8 .4 0 0
-2B2B B3B .5563 .4902 2.1 .4 0 0
-3B2C B3C 0
C -----
C ***** Cabo 1/0 CAA (1,6 km) *****
-1B3A B4A .87372.0188 .8 1.6 0 0
-2B3B B4B .6961 .4995 2.1 1.6 0 0
-3B3C B4C 0
C -----
C ***** Cabo 1/0 CAA (2,5 km) *****
-1B4A B5A .87372.0188 .8 2.5 0 0
-2B4B B5B .6961 .4995 2.1 2.5 0 0
-3B4C B5C 0
C -----
C ***** Cabo 1/0 CAA (2,0 km) *****
-1B5A B6A .87372.0188 .8 2.0 0 0
-2B5B B6B .6961 .4995 2.1 2.0 0 0
-3B5C B6C 0
C -----
C ***** Cabo 1/0 CAA (0,3 km) *****
-1CHCARAB7A .87372.0188 .8 .3 0 0
-2CHCARBB7B .6961 .4995 2.1 .3 0 0
-3CHCARCB7C 0
C -----
C ***** Cabo 1/0 CAA (4,1 km) *****
-1B7A B8A .87372.0188 .8 4.1 0 0
-2B7B B8B .6961 .4995 2.1 4.1 0 0
-3B7C B8C 0
C -----
C ***** Cabo 1/0 CAA (1,5 km) *****
-1B8A B9A .87372.0188 .8 1.5 0 0
-2B8B B9B .6961 .4995 2.1 1.5 0 0
-3B8C B9C 0
C -----
C ***** Cabo 35mm2 Al (1,1 km) *****
-1B9A B10A 1.29082.7203 .8 1.1 0 0
-2B9B B10B 1.113 .3212 2.1 1.1 0 0
-3B9C B10C 0
C -----
C ***** Carga na Barra 2 *****
C2A 923.58 0
C2B 879.6 0
C2C 835.62 0
C2A 391.52 0
C2B 372.88 0
C2C 354.24 0
C -----
C ***** Carga na Barra 4 *****
C4A 1598.5 0
C4B 1522.4 0
C4C 1446.3 0

```

C4A	677.63	0
C4B	645.36	0
C4C	613.09	0
-----		
C		
***** Carga na Barra 5 *****		
C5A	725.68	0
C5B	691.12	0
C5C	656.56	0
C5A	307.62	0
C5B	292.97	0
C5C	278.32	0
-----		
C		
***** Carga na Barra 7 *****		
C7A	1339.2	0
C7B	1275.4	0
C7C	1211.7	0
C7A	567.7	0
C7B	540.67	0
C7C	513.64	0
-----		
C		
***** Carga na Barra 8 *****		
C8A	754.85	0
C8B	718.91	0
C8C	682.96	0
C8A	319.99	0
C8B	304.75	0
C8C	289.51	0
-----		
C		
***** Carga na Barra 9 *****		
C9A	1635.5	0
C9B	1557.6	0
C9C	1479.8	0
C9A	693.31	0
C9B	660.3	0
C9C	627.29	0
-----		
C		
***** Carga na Barra 10 *****		
C10A	1962.6	0
C10B	1869.2	0
C10C	1775.7	0
C10A	831.98	0
C10B	792.36	0
C10C	752.74	0
-----		
C		
***** Resistência do RLS - LCC *****		
RIND1AINDA	.05	0
RIND1BINDB	.05	0
RIND1CINDC	.05	0
-----		
C		
***** RLS - LCC *****		
INDA CAP1A	19.	3
INDB CAP1B	19.	0
INDC CAP1C	19.	0
-----		
C		
***** BCS *****		
CAP1A CAP2-A	32000.	3
CAP1B CAP2-B	32000.	0
CAP1C CAP2-C	32000.	0
-----		
C		
***** Resistência de Amortecimento do RNS *****		
CAP1A REA-A	20.	3
CAP1B REA-B	20.	0
CAP1C REA-C	20.	0
-----		
C		
***** RNS - Fase A *****		
98REA-A CAP2-A	0.0 0.0	3
0.0667	3.2486	



0.0760	4.0608
0.0858	4.8730
0.0956	5.6851
0.1044	6.4973
0.1133	7.3094
0.1182	8.1216
0.1222	8.5277
0.1276	8.9338
0.1320	9.3398
0.1396	9.7459
0.1476	10.1520
0.1573	10.5581
0.1711	10.9642
0.1844	11.3702
0.2080	11.7763
0.2400	12.1824
0.2556	12.3448
0.2733	12.5073
0.2978	12.6697
0.3289	12.8321
0.3689	12.9946
0.4267	13.1570
0.4800	13.3194
0.5778	13.4819
0.6667	13.6443
0.8222	13.8067
0.9111	13.8879
1.0000	13.9692
1.1333	14.0504
1.2667	14.1316
1.4489	14.2128
1.5778	14.2940
1.8667	14.3752
2.1111	14.4564
2.4889	14.5377
2.8000	14.6189
3.4222	14.7001
3.9111	14.7813
4.6667	14.8625
5.3334	14.9437
6.2223	15.0250
6.6667	15.1062
7.7778	15.1874
8.8889	15.2686
13.9627	15.5935
27.9254	15.9183
55.8508	15.9996

9999

```

C -----
C ***** RNS - Fase B *****
98REA-B CAP2-B          0.0  0.0          1
  0.0667          3.2486
  0.0760          4.0608
  0.0858          4.8730
  0.0956          5.6851
  0.1044          6.4973
  0.1133          7.3094
  0.1182          8.1216
  0.1222          8.5277
  0.1276          8.9338
  0.1320          9.3398
  0.1396          9.7459
  0.1476          10.1520
  0.1573          10.5581
  0.1711          10.9642
  0.1844          11.3702
  0.2080          11.7763

```

0.2400	12.1824
0.2556	12.3448
0.2733	12.5073
0.2978	12.6697
0.3289	12.8321
0.3689	12.9946
0.4267	13.1570
0.4800	13.3194
0.5778	13.4819
0.6667	13.6443
0.8222	13.8067
0.9111	13.8879
1.0000	13.9692
1.1333	14.0504
1.2667	14.1316
1.4489	14.2128
1.5778	14.2940
1.8667	14.3752
2.1111	14.4564
2.4889	14.5377
2.8000	14.6189
3.4222	14.7001
3.9111	14.7813
4.6667	14.8625
5.3334	14.9437
6.2223	15.0250
6.6667	15.1062
7.7778	15.1874
8.8889	15.2686
13.9627	15.5935
27.9254	15.9183
55.8508	15.9996

9999

```

C -----
C ***** RNS - Fase C *****
98REA-C CAP2-C          0.0  0.0          1
0.0667    3.2486
0.0760    4.0608
0.0858    4.8730
0.0956    5.6851
0.1044    6.4973
0.1133    7.3094
0.1182    8.1216
0.1222    8.5277
0.1276    8.9338
0.1320    9.3398
0.1396    9.7459
0.1476   10.1520
0.1573   10.5581
0.1711   10.9642
0.1844   11.3702
0.2080   11.7763
0.2400   12.1824
0.2556   12.3448
0.2733   12.5073
0.2978   12.6697
0.3289   12.8321
0.3689   12.9946
0.4267   13.1570
0.4800   13.3194
0.5778   13.4819
0.6667   13.6443
0.8222   13.8067
0.9111   13.8879
1.0000   13.9692
1.1333   14.0504
1.2667   14.1316

```

1.4489	14.2128
1.5778	14.2940
1.8667	14.3752
2.1111	14.4564
2.4889	14.5377
2.8000	14.6189
3.4222	14.7001
3.9111	14.7813
4.6667	14.8625
5.3334	14.9437
6.2223	15.0250
6.6667	15.1062
7.7778	15.1874
8.8889	15.2686
13.9627	15.5935
27.9254	15.9183
55.8508	15.9996

9999

```

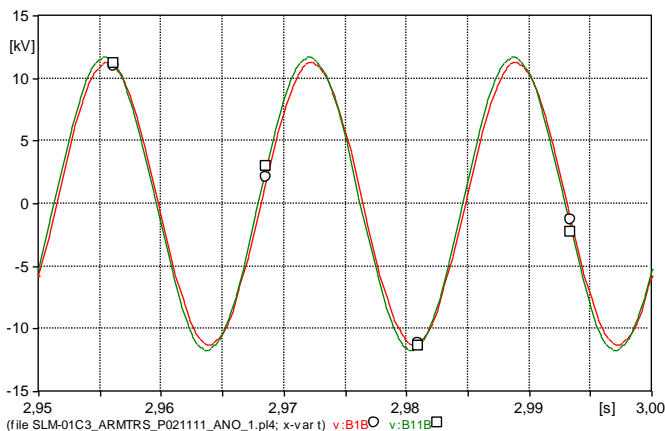
C -----
C ***** Defeito *****
B10A  CURTOA           1.           1
B10B  CURTOB           1.           0
B10C  CURTOC           1.           0
C -----
C ***** Resistência entre Chaves *****
RESCCARETCCA         .01           0
RESCCBRETCCB         .01           0
RESCCRETCCC          .01           0
C -----
C ***** Chaves do circuito *****
/SWITCH
C < n 1>< n 2>< Tclose ><Top/Tde >< Ie ><Vf/CLOP >< type >
C ***** Chave no ponto P0 *****
P0A   B1A             -1.          10.           0
P0B   B1B             -1.          10.           0
P0C   B1C             -1.          10.           0
C ***** Chave na Carga 2 *****
B2A   C2A             -1.          10.           0
B2B   C2B             -1.          10.           0
B2C   C2C             -1.          10.           0
C ***** Chave na Carga 4 *****
B4A   C4A             -1.          10.           0
B4B   C4B             -1.          10.           0
B4C   C4C             -1.          10.           0
C ***** Chave na Carga 5 *****
B5A   C5A             -1.          10.           0
B5B   C5B             -1.          10.           0
B5C   C5C             -1.          10.           0
C ***** Chave na Carga 7 *****
B7A   C7A             -1.          10.           0
B7B   C7B             -1.          10.           0
B7C   C7C             -1.          10.           0
C ***** Chave na Carga 8 *****
B8A   C8A             -1.          10.           0
B8B   C8B             -1.          10.           0
B8C   C8C             -1.          10.           0
C ***** Chave na Carga 9 *****
B9A   C9A             -1.          10.           0
B9B   C9B             -1.          10.           0
B9C   C9C             -1.          10.           0
C ***** Chave na Carga 10 *****
B10A  C10A            -1.          10.           0
B10B  C10B            -1.          10.           0
B10C  C10C            -1.          10.           0
C ***** Chave em série a montante do ARMTRS *****
B6A   RIND1A          -1.          10.           1
B6B   RIND1B          -1.          10.           0

```

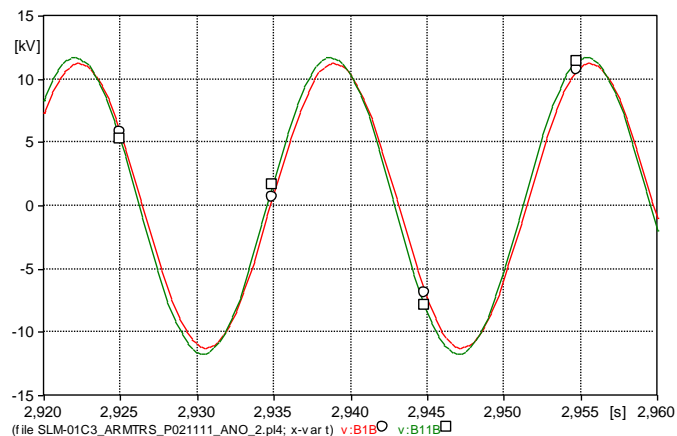
```

B6C RIND1C -1. 10. 0
C ***** Chave em série a jusante do ARMTRS - Carga *****
CAP2-ACHCARA -1. 10. 1
CAP2-BCHCARB -1. 10. 0
CAP2-CCHCARC -1. 10. 0
C ***** Chave aberta em paralelo com RNS *****
CAP1B CAP2-B 10. 1.E3 0
CAP1C CAP2-C 10. 1.E3 0
CAP1A CAP2-A 10. 1.E3 0
C ***** Chave do Defeito *****
CURTOARESCCA 1.2 15. 0
CURTOBRESCCB 15. 15. 0
CURTOCRESCCC 15. 15. 0
C ***** Chave Retirada do Defeito *****
RETCCA -1. 2.2 0
RETCCB 15. 15. 0
RETCCC 15. 15. 0
/SOURCE
C -----
C ***** Tensão Equivalente do Sistema *****
C < n 1><> < Ampl. >< Freq. ><Phase/T0>< A1 >< T1 >< TSTART >< TSTOP >
14FONTEA 0 11644.556 60. -1. 5.
14FONTEB 0 11644.556 60. -120. -1. 5.
14FONTEC 0 11644.556 60. 120. -1. 5.
C -----
C ***** Tensão na Barras *****
/OUTPUT
B1A B1B B1C B3A B3B B3C B2A B2B B2C B5A B5B B5C B4A
B4B B4C B7A B7B B7C B6A B6B B6C B9A B9B B9C B8A B8B
B8C B10A B10B B10C CAP2-BCAP1B CAP2-CCAP1C CAP2-ACAP1A
BLANK BRANCH
BLANK SWITCH
BLANK SOURCE
BLANK OUTPUT
BLANK PLOT
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK
    
```

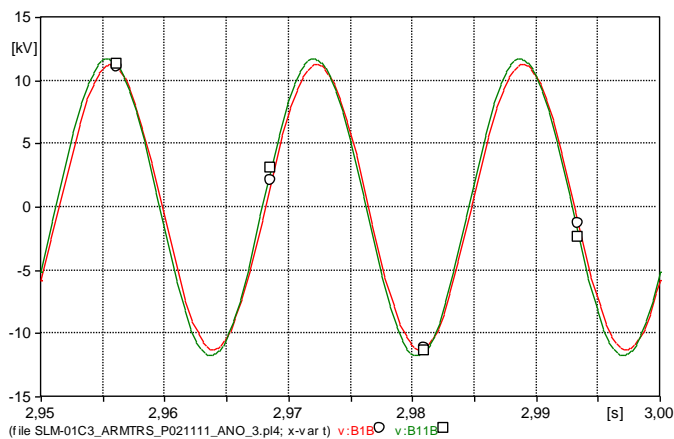
### 6.7 - Análise do sistema SLM-01C3 em regime permanente senoidal de operação ao longo dos anos



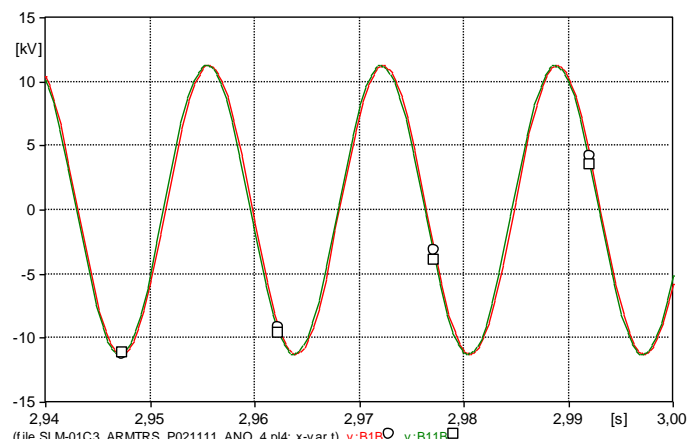
**Figura 6.1** - Forma de onda das tensões no Ponto P0(○) e na Barra 8,5km (□) – SLM-01C3 – Ano 1.



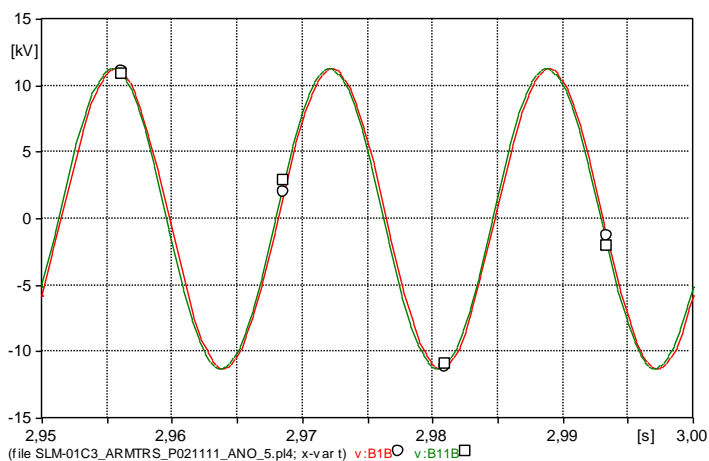
**Figura 6.2** - Forma de onda das tensões no Ponto P0(○) e na Barra 8,5km (□) – SLM-01C3 – Ano 2.



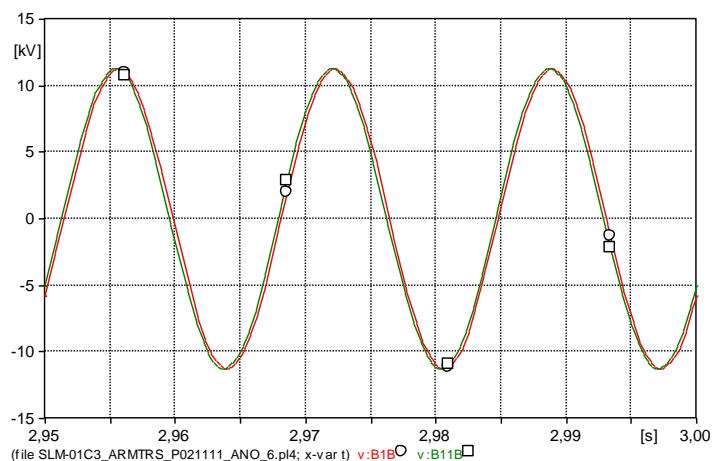
**Figura 6.3** - Forma de onda das tensões no Ponto P0(○) e na Barra 8,5km (□) – SLM-01C3 – Ano 3.



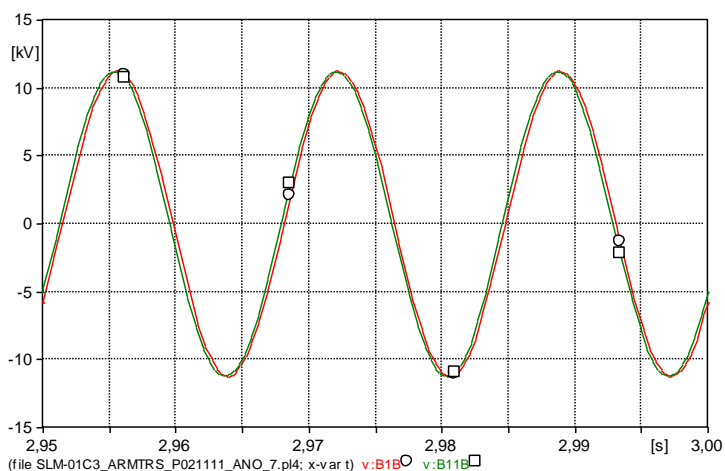
**Figura 6.4** - Forma de onda das tensões no Ponto P0(○) e na Barra 8,5km (□) – SLM-01C3 – Ano 4.



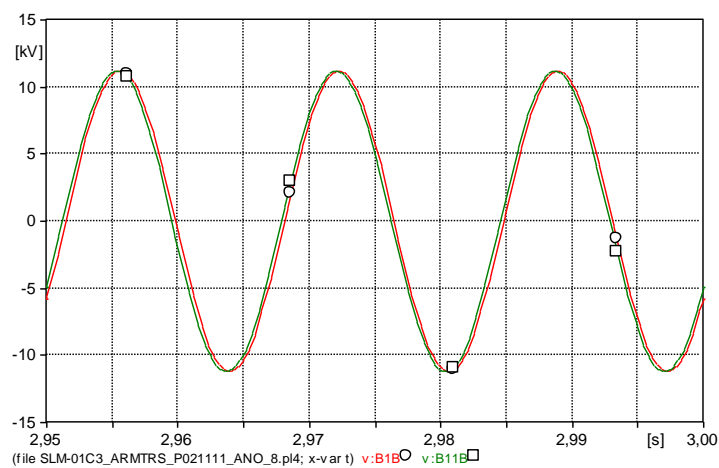
**Figura 6.5** - Forma de onda das tensões no Ponto P0(○) e na Barra 8,5km (□) – SLM-01C3 – Ano 5.



**Figura 6.6** - Forma de onda das tensões no Ponto P0(○) e na Barra 8,5km (□) – SLM-01C3 – Ano 6.

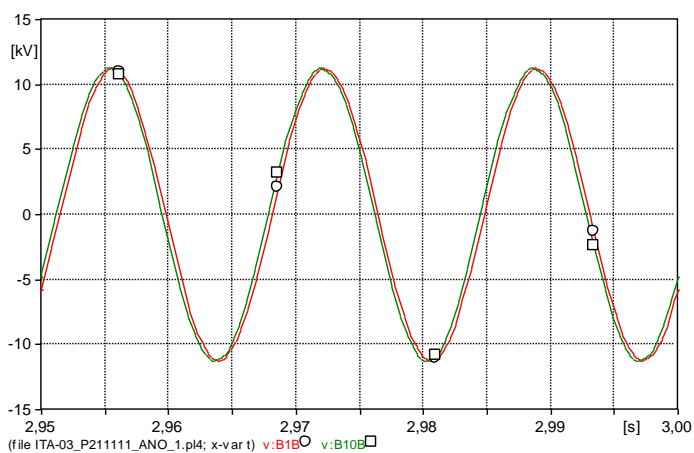


**Figura 6.7** - Forma de onda das tensões no Ponto P0(○) e na Barra 8,5km (□) – SLM-01C3 – Ano 7.

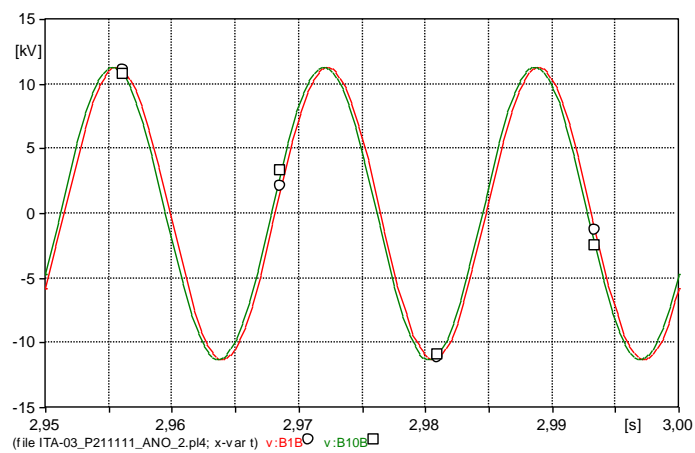


**Figura 6.8** - Forma de onda das tensões no Ponto P0(○) e na Barra 8,5km (□) – SLM-01C3 – Ano 8.

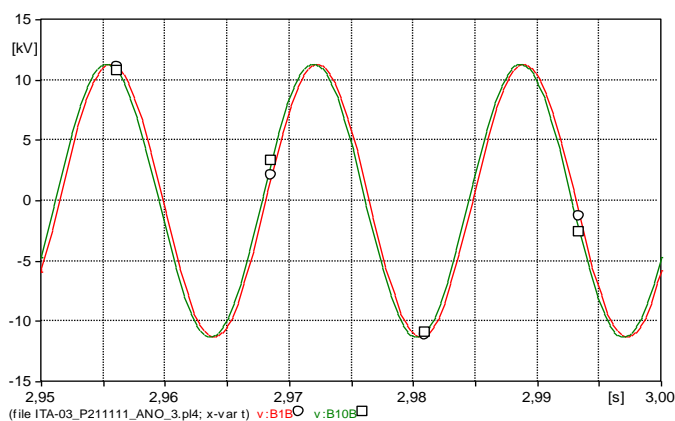
## 6.8 – Análise do sistema ITA-03 em regime permanente senoidal de operação ao longo dos anos



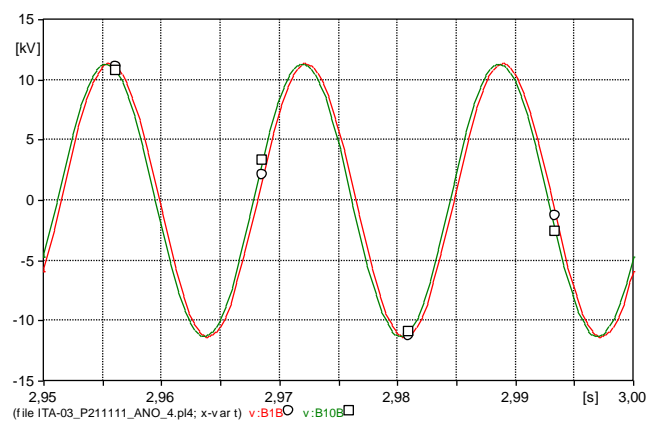
**Figura 6.9** - Forma de onda das tensões no Ponto P0(○) e na Barra 14,5km (□) –ITA-03 – Ano 1.



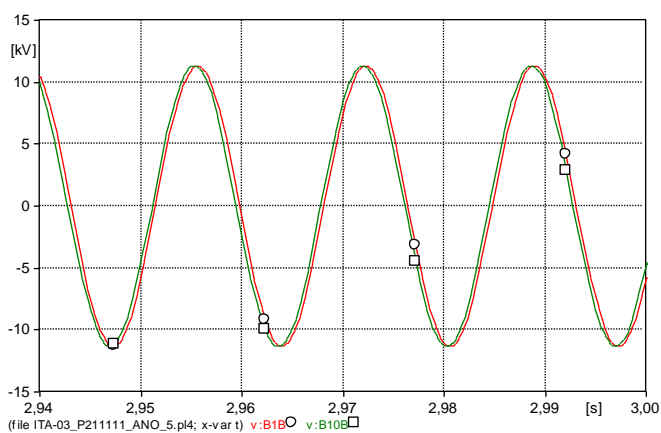
**Figura 6.10** - Forma de onda das tensões no Ponto P0(○) e na Barra 14,5km (□) –ITA-03 – Ano 2.



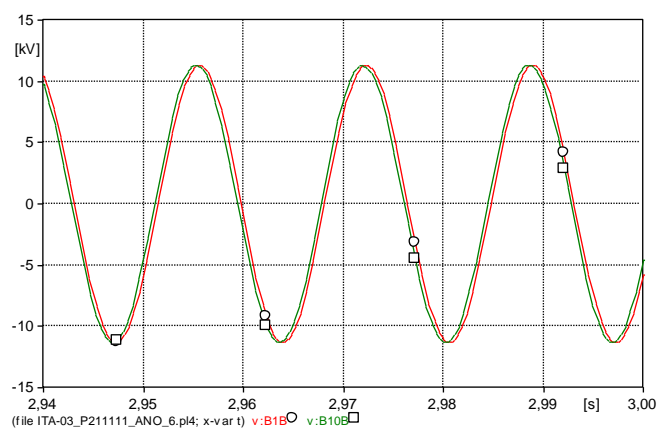
**Figura 6.11** - Forma de onda das tensões no Ponto P0(○) e na Barra 14,5km (□) –ITA-03 – Ano 3.



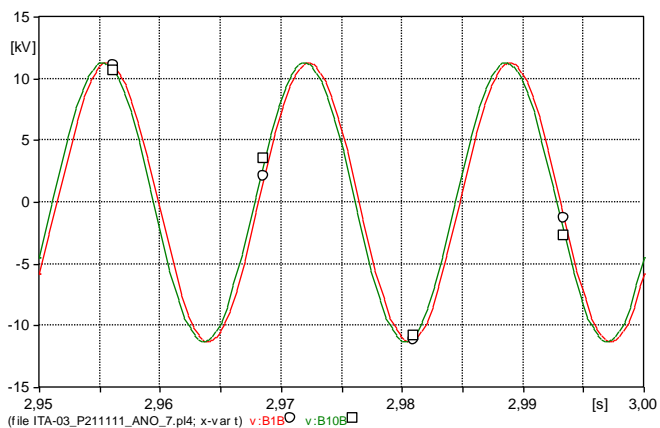
**Figura 6.12** - Forma de onda das tensões no Ponto P0(○) e na Barra 14,5km (□) –ITA-03 – Ano 4.



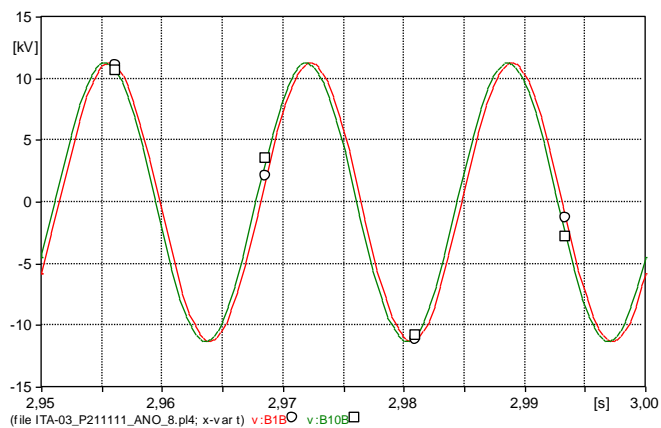
**Figura 6.13** - Forma de onda das tensões no Ponto P0(○) e na Barra 14,5km (□) –ITA-03 – Ano 5.



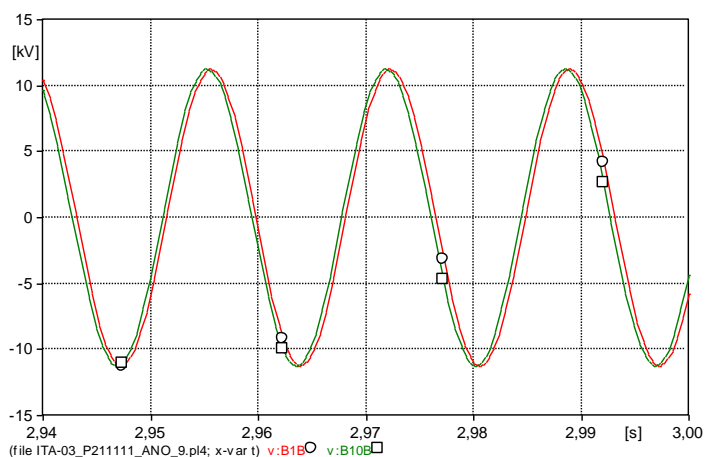
**Figura 6.14** - Forma de onda das tensões no Ponto P0(○) e na Barra 14,5km (□) –ITA-03 – Ano 6.



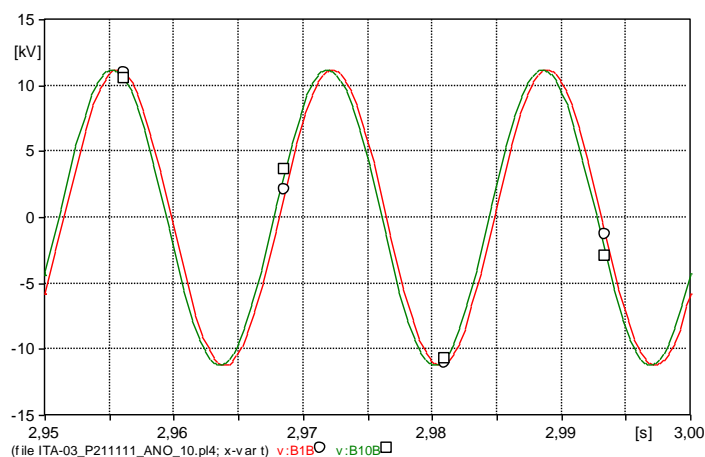
**Figura 6.15** - Forma de onda das tensões no Ponto P0(○) e na Barra 14,5km (□) –ITA-03 – Ano 7.



**Figura 6.16** - Forma de onda das tensões no Ponto P0(○) e na Barra 14,5km (□) –ITA-03 – Ano 8.

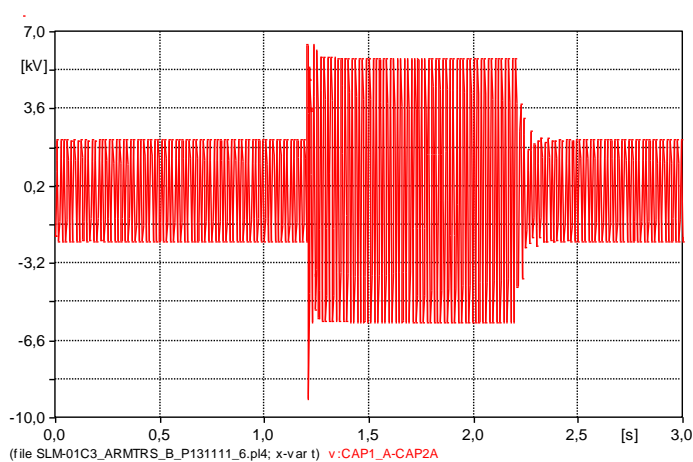


**Figura 6.17** - Forma de onda das tensões no Ponto P0(○) e na Barra 14,5km (□) –ITA-03 – Ano 9.

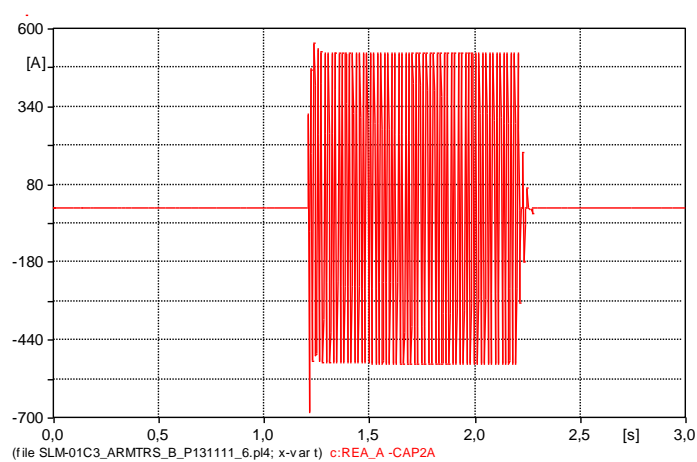


**Figura 6.18** - Forma de onda das tensões no Ponto P0(○) e na Barra 14,5km (□) –ITA-03 – Ano 10.

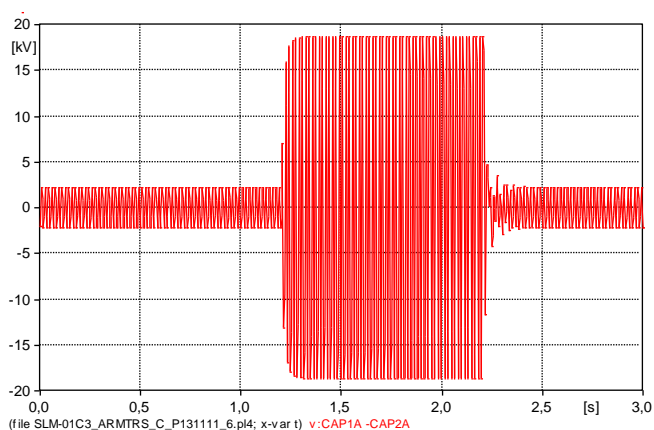
## 6.9 – Análise das diferentes arquiteturas – SLM-01C3



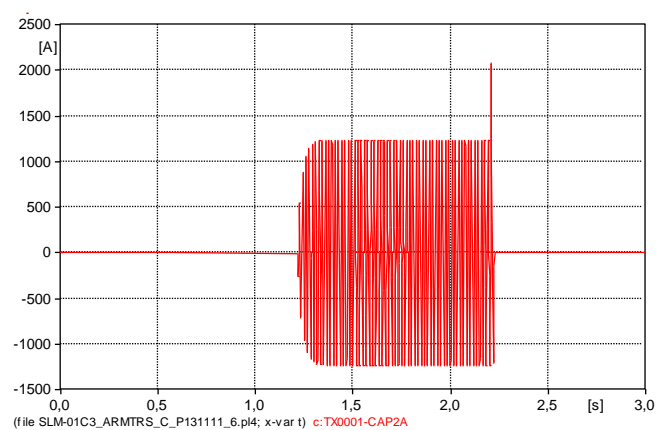
**Figura 6.19** - Forma de onda da tensão no BCS para a Arquitetura ARMTRS – B (antes, durante e depois de um defeito) – SLM-01C3.



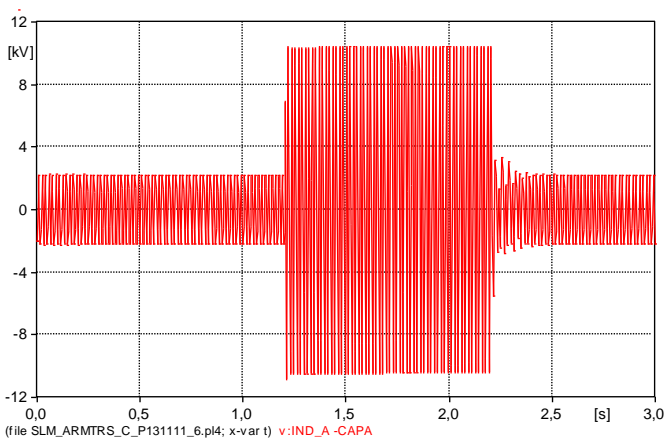
**Figura 6.20** – Forma de onda da corrente no RNS principal para a Arquitetura ARMTRS – B (antes, durante e depois de um defeito) – SLM01C3.



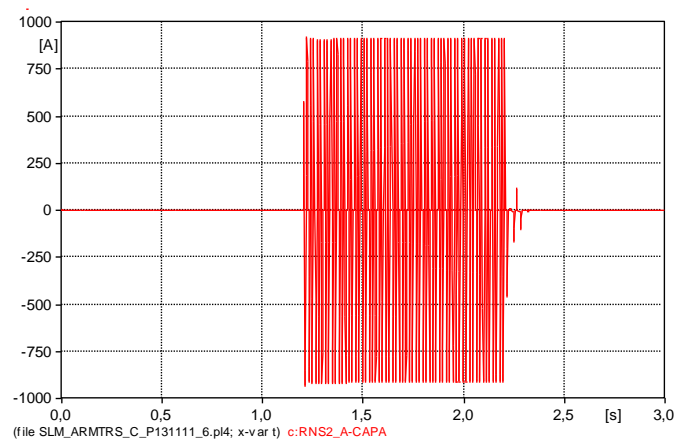
**Figura 6.21** – Forma de onda da tensão no BCS para a Arquitetura ARMTRS – C (antes, durante e depois de um defeito) – SLM-01C3.



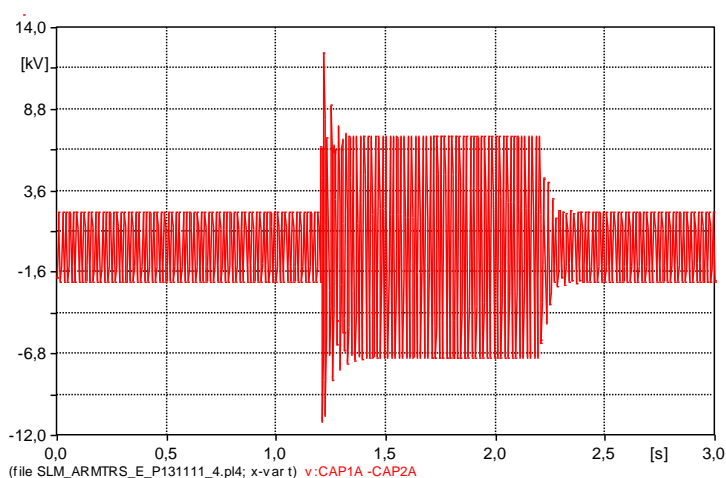
**Figura 6.22** – Forma de onda da corrente no RNS para a Arquitetura ARMTRS – C (antes, durante e depois de um defeito) – SLM-01C3.



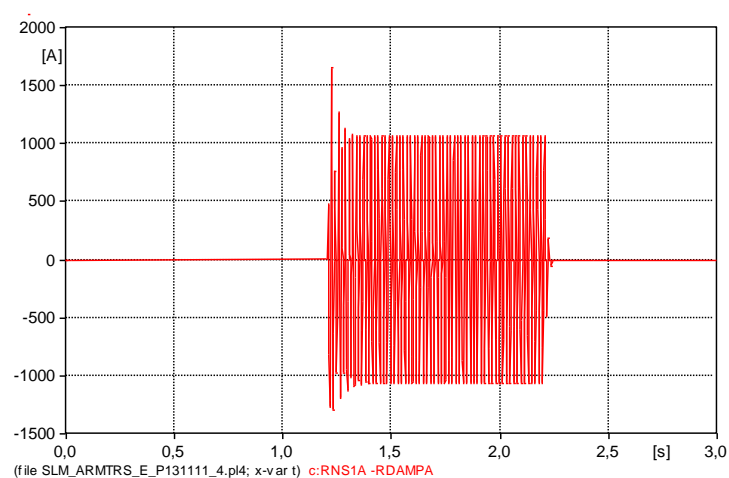
**Figura 6.23** - Forma de onda da tensão no BCS para a Arquitetura ARMTRS – D (antes, durante e depois de um defeito) – SLM-01C3.



**Figura 6.24** – Forma de onda da corrente no RNS principal para a Arquitetura ARMTRS – D (antes, durante e depois de um defeito) – SLM-01C3.



**Figura 6.25** - Forma de onda da tensão no BCS para a Arquitetura ARMTRS – E (antes, durante e depois de um defeito) – SLM-01C3.



**Figura 6.26** - Forma de onda da corrente no RNS principal para a Arquitetura ARMTRS – E (antes, durante e depois de um defeito) – SLM-01C3.



## 6.10 – Roteiro em ATP da Estrutura Assimétrica com elemento 98 e sem dual eletromagnético

```

BEGIN NEW DATA CASE
C -----
C Generated by ATPDRAW  abril, terça-feira 26, 2011
C A Bonneville Power Administration program
C by H. K. Høidalen at SEfAS/NTNU - NORWAY 1994-2006
C -----
C  dT  >> Tmax >> Xopt >> Copt >
   1.E-6   .5   60.   60.
     500     1     1     1     1     0     0     1     0
C ***** Início da Tacs *****
/TACS
TACS HYBRID
/TACS
90CARG                                     1.E3
90REA                                     1.E3
  1REA_1   +REA                               1.
           1.
           1.
  1REA_2   +CARG                               1.
           1.
           1.
C ***** Início do Circuito Eletrico *****
C      1      2      3      4      5      6      7      8
C 3456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
/BRANCH
C < n1 >> n2 >>ref1>>ref2>> R >> L >> C >
C < n1 >> n2 >>ref1>>ref2>> R >> A >> B >>Leng>><><>0
FONT  EQUIV                               .06                               0
EQUIV R1                                5.5                               3
R1    IND                                .3                               0
IND   CAP                                3.2                               3
CAP   CARG                               2.22E5                          3
98REA  CARG                               0.0    0.0                          3
      0.0325      0.0087
      0.0551      0.0188
      0.0806      0.0319
      0.0990      0.0421
      0.1258      0.0571
      0.1499      0.0690
      0.1838      0.0841
      0.2093      0.0933
      0.2333      0.1004
      0.2941      0.1154
      0.3917      0.1324
      0.5090      0.1449
      0.8640      0.1586
      1.3080      0.1697
      1.9937      0.1823
      2.8987      0.1957
      3.6340      0.2056
      4.2420      0.2116
      5.3025      0.2207
      6.2499      0.2295
      6.7448      0.2334
      7.9325      0.2408
      9.0779      0.2476
      10.0394     0.2530
      11.6655     0.2603
      13.2209     0.2657
      15.3278     0.2693
      17.0246     0.2727
      20.2909     0.2755

```

```

23.4441      0.2781
26.5832      0.2799
31.0232      0.2816
          9999
R2   REA              .3                      1
REA  CARG             325.                    1
CARG              72.                        3
DEF              25.25                       3
R3   R4              .001                    3
REA_1             1.E6                       2
REA_2             1.E6                       2
/SWITCH
C < n 1>< n 2>< Tclose ><Top/Tde >< Ie ><Vf/CLOP >< type >
CAP  R2              -1.      1.E3           0
CARG R3              .0321    1.E3           0
R4   DEF             -1.      .25            0
/SOURCE
C < n 1>< >< Ampl. >< Freq. ><Phase/T0>< A1 >< T1 >< TSTART >< TSTOP >
14FONT 0           311.7      60.          -1.      1.E3
60REA_2 0
60REA_1 0
/OUTPUT
R1   CAP  CARG
BLANK TACS
BLANK BRANCH
BLANK SWITCH
BLANK SOURCE
BLANK OUTPUT
BLANK PLOT
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK

```

## 6.11 – Roteiro em ATP da Estrutura Simétrica com elemento 98 e sem dual eletromagnético

```

BEGIN NEW DATA CASE
C -----
C Generated by ATPDRAW  abril, terça-feira 26, 2011
C A Bonneville Power Administration program
C by H. K. Høidalen at SEFAS/NTNU - NORWAY 1994-2006
C -----
C dT >< Tmax >< Xopt >< Copt >
1.E-6   .50   60.   60.
500     1     1     1     1     0     0     1     0
C ***** Início da Tacs *****
/TACS
TACS HYBRID
/TACS
90CARG                                1.E3
90REA                                  1.E3
1REA_1  +REA                          1.
1.
1.
1REA_2  +CARG                          1.
1.
1.
C ***** Início do Circuito Eletrico *****
C 1 2 3 4 5 6 7 8
C 3456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
/BRANCH
C < n1 >< n2 ><ref1><ref2>< R >< L >< C >
C < n1 >< n2 ><ref1><ref2>< R >< A >< B ><Leng><><>0

```

```

FONT  EQUIV          .06                                0
EQUIV R1              5.5                              3
R1    IND              .3                              0
IND   CAP              3.5                              3
CAP   CARG             2.22E5                          3
98REA CARG             0.0   0.0                       3
      0.0226          0.0117
      0.0424          0.0330
      0.0509          0.0481
      0.0650          0.0661
      0.0778          0.0836
      0.0962          0.1003
      0.1174          0.1138
      0.1584          0.1285
      0.3959          0.1470
      1.0605          0.1581
      1.8849          0.1719
      2.8563          0.1844
      3.9309          0.1982
      5.7833          0.2183
      7.6356          0.2354
      10.6474         0.2582
      12.8108         0.2679
      20.3616         0.2809
      27.0074         0.2877
      33.7663         0.2914
          9999
R2    REA              .3                              1
REA   CARG             325.                             1
CARG  CARG              72.                             3
DEF   DEF              25.25                            3
R3    R4               .001                             3
REA_1 REA              1.E6                             2
REA_2 REA              1.E6                             2
/SWITCH
C < n 1>< n 2>< Tclose ><Top/Tde >< Ie   ><Vf/CLOP >< type >
CAP  R2                -1.          1.E3                0
CARG R3                 .0441       1.E3                0
R4   DEF               -1.          0.25                0
/SOURCE
C < n 1><>< Ampl. >< Freq. ><Phase/T0><  A1 >< T1 >< TSTART >< TSTOP >
14FONT  0      311.7      60.          -1.          1.E3
60REA_2  0
60REA_1  0          1.E3
/OUTPUT
R1    CAP   CARG  EQUIV
BLANK TACS
BLANK BRANCH
BLANK SWITCH
BLANK SOURCE
BLANK OUTPUT
BLANK PLOT
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK

```

## 6.12 – Roteiro em ATP da Estrutura Assimétrica com elemento 96 e sem dual eletromagnético

```

BEGIN NEW DATA CASE
C -----
C Generated by ATPDRAW maio, domingo 1, 2011
C A Bonneville Power Administration program
C by H. K. Høidalen at SEFAS/NTNU - NORWAY 1994-2006

```

```

C -----
C dT >> Tmax >> Xopt >> Copt >
  1.E-6      .5      60.      60.
    500      1      1      1      1      1      0      0      1      0
C      1      2      3      4      5      6      7      8
C 3456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
/BRANCH
C < n1 >> n2 >>ref1><ref2>< R >> L >> C >
C < n1 >> n2 >>ref1><ref2>< R >> A >> B >><Leng><><>0
FONT EQUIV .06 0
EQUIV R1 5.5 3
R1 IND .3 0
IND CAP 3.3 3
CAP CARG 2.22E5 3
R2 REA .3 1
CARG 72. 3
DEF 25.25 3
R3 R4 .001 3
96REA CARG 0.0 0.0 3
-30.7876 -0.2816
-26.3477 -0.2799
-23.2086 -0.2781
-20.0554 -0.2755
-16.7890 -0.2727
-15.0922 -0.2693
-12.9854 -0.2657
-11.4300 -0.2603
-9.8039 -0.2530
-8.8423 -0.2476
-7.6970 -0.2408
-6.5092 -0.2334
-6.0143 -0.2295
-5.0670 -0.2207
-4.0065 -0.2116
-3.3984 -0.2056
-2.6632 -0.1957
-1.7582 -0.1823
-1.0724 -0.1697
-0.6284 -0.1586
-0.2735 -0.1449
-0.1561 -0.1324
-0.0586 -0.1154
0.0022 -0.1004
0.0263 -0.0933
0.0517 -0.0841
0.0857 -0.0690
0.1097 -0.0571
0.1366 -0.0421
0.1550 -0.0319
0.1804 -0.0188
0.2030 -0.0087
0.2681 0.0087
0.2907 0.0188
0.3161 0.0319
0.3345 0.0421
0.3614 0.0571
0.3854 0.0690
0.4194 0.0841
0.4448 0.0933
0.4689 0.1004
0.5297 0.1154
0.6272 0.1324
0.7446 0.1449
1.0995 0.1586
1.5435 0.1697
2.2293 0.1823
3.1343 0.1957

```

```

3.8695      0.2056
4.4776      0.2116
5.5381      0.2207
6.4854      0.2295
6.9803      0.2334
8.1681      0.2408
9.3134      0.2476
10.2750     0.2530
11.9011     0.2603
13.4565     0.2657
15.5633     0.2693
17.2601     0.2727
20.5265     0.2755
23.6797     0.2781
26.8188     0.2799
31.2587     0.2816
          9999
/SWITCH
C < n 1>< n 2>< Tclose ><Top/Tde >< Ie ><Vf/CLOP >< type >
CAP  R2      -1.      1.E3      0
CARG R3      .0321    1.E3      0
R4   DEF     -1.      .25      0
/SOURCE
C < n 1><>< Ampl. >< Freq. ><Phase/T0>< A1 >< T1 >< TSTART >< TSTOP >
14FONT 0      311.7    60.      -1.      1.E3
/OUTPUT
R1   CAP  CARG
BLANK BRANCH
BLANK SWITCH
BLANK SOURCE
BLANK OUTPUT
BLANK PLOT
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK

```

## 6.13 – Roteiro em ATP da Estrutura Simétrica com elemento 96 e sem dual eletromagnético

```

BEGIN NEW DATA CASE
C -----
C Generated by ATPDRAW maio, domingo 1, 2011
C A Bonneville Power Administration program
C by H. K. Høidalen at SEFAS/NTNU - NORWAY 1994-2006
C -----
C dT >< Tmax >< Xopt >< Copt >
1.E-6      .5      60.      60.
500        1      1      1      1      0      0      1      0
C 1 2 3 4 5 6 7 8
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
/BRANCH
C < n1 >< n2 ><ref1><ref2>< R >< L >< C >
C < n1 >< n2 ><ref1><ref2>< R >< A >< B ><Leng><><>0
FONT  EQUIV      .06      0
EQUIV R1      5.5      3
R1   IND      .07      0
IND  CAP      3.5      3
CAP  CARG      2.22E5    3
R2   REA      .07      1
CARG      72.      3
DEF   25.25      3
R3   R4      .001     3
96REA CARG      0.0     0.0    3
-33.5958     -0.2914
-26.8368     -0.2877
-20.1910     -0.2809
-12.6403     -0.2679

```

```

-10.4769      -0.2582
-7.4650       -0.2354
-5.6127       -0.2183
-3.7604       -0.1982
-2.6857       -0.1844
-1.7143       -0.1719
-0.8899       -0.1581
-0.2254       -0.1470
0.0122        -0.1285
0.0532        -0.1138
0.0744        -0.1003
0.0928        -0.0836
0.1055        -0.0661
0.1197        -0.0481
0.1281        -0.0330
0.1479        -0.0117
0.1932         0.0117
0.2130         0.0330
0.2215         0.0481
0.2356         0.0661
0.2483         0.0836
0.2667         0.1003
0.2879         0.1138
0.3289         0.1285
0.5665         0.1470
1.2311         0.1581
2.0554         0.1719
3.0268         0.1844
4.1015         0.1982
5.9538         0.2183
7.8062         0.2354
10.8180        0.2582
12.9814        0.2679
20.5322        0.2809
27.1780        0.2877
33.9369        0.2914
          9999
/SWITCH
C < n 1>< n 2>< Tclose ><Top/Tde >< Ie ><Vf/CLOP >< type >
CAP  R2          -1.      1.E3          0
CARG  R3          .0441   1.E3          0
R4    DEF         -1.      .25           0
/SOURCE
C < n 1><>< Ampl. >< Freq. ><Phase/T0>< A1 >< T1 >< TSTART >< TSTOP >
14FONT 0      311.7      60.          -1.      1.E3
/OUTPUT
R1      CAP  CARG
BLANK BRANCH
BLANK SWITCH
BLANK SOURCE
BLANK OUTPUT
BLANK PLOT
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK

```

## 6.14 – Roteiro em ATP da Estrutura Assimétrica com elemento 98 e com dual eletromagnético

```

BEGIN NEW DATA CASE
C -----
C Generated by ATPDRAW maio, segunda-feira 9, 2011
C A Bonneville Power Administration program
C by H. K. Høidalen at SEfAS/NTNU - NORWAY 1994-2006
C -----

```

```

C dT >< Tmax >< Xopt >< Copt >
  1.E-6      .5      60.      60.
    500      1      1      1      1      0      0      1      0
/TACS
TACS HYBRID
/TACS
90CAP
  1IND_1 +CAP
    1.
      1.
      1.
      1.E3
90IND_R
  1IND_R1 +IND_R
    1.
      1.
      1.
      1.E3
90CARG
  1IND_R2 +CARG
    1.
      1.
      1.
      1.E3
90REA
  1REA_1 +REA
    1.
      1.
      1.
      1.E3
90IND
  1IND_3 +IND
    1.
      1.
      1.
      1.E3
C      1      2      3      4      5      6      7      8
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
/BRANCH
C < n1 >< n2 ><ref1><ref2>< R >< L >< C >
C < n1 >< n2 ><ref1><ref2>< R >< A >< B ><Leng><><>0
  FONT FONT_R      .06
  FONT_RIND_R      5.5
  CAP REA      325.
  IND_R IND      .3
  CAP CARG      2.22E5
C ***** Reatância do Jugo *****
  IND CAP      2.4
C ***** JUGO 2 *****
98CAP CARG      0.0 0.0
  0.0045      0.0104
  0.0077      0.0226
  0.0112      0.0383
  0.0138      0.0505
  0.0175      0.0685
  0.0208      0.0828
  0.0255      0.1010
  0.0291      0.1119
  0.0324      0.1205
  0.0409      0.1385
  0.0544      0.1589
  0.0707      0.1738
  0.1200      0.1904
  0.1817      0.2036
  0.2770      0.2188
  0.4027      0.2348
  0.5049      0.2467
  0.5893      0.2539
  0.7367      0.2648
  0.8683      0.2754
  0.9371      0.2801
  1.1021      0.2890
  1.2612      0.2971
  1.3948      0.3036
  1.6207      0.3123
  1.8368      0.3189
  2.1295      0.3232

```

2.3652	0.3272			
2.8190	0.3306			
3.2571	0.3337			
3.6932	0.3359			
4.3101	0.3379			
	9999			
CARG		72.		3
DEF		25.25		3
R3	R4	.001		3
C CAP	CARG	325.		0
C CAP	CARG	325.		0
C	***** RETORNO *****			
98IND_R	CARG	0.0	0.0	3
	0.0089	0.0104		
	0.0152	0.0226		
	0.0222	0.0383		
	0.0272	0.0505		
	0.0346	0.0685		
	0.0412	0.0828		
	0.0505	0.1010		
	0.0575	0.1119		
	0.0641	0.1205		
	0.0808	0.1385		
	0.1077	0.1589		
	0.1399	0.1738		
	0.2375	0.1904		
	0.3595	0.2036		
	0.5481	0.2188		
	0.7968	0.2348		
	0.9989	0.2467		
	1.1661	0.2539		
	1.4576	0.2648		
	1.7180	0.2754		
	1.8541	0.2801		
	2.1806	0.2890		
	2.4954	0.2971		
	2.7597	0.3036		
	3.2067	0.3123		
	3.6343	0.3189		
	4.2134	0.3232		
	4.6799	0.3272		
	5.5777	0.3306		
	6.4445	0.3337		
	7.3074	0.3359		
	8.5279	0.3379		
	9999			
C	***** JUGO 1 *****			
98IND_R	CARG	0.0	0.0	3
	0.0028	0.0104		
	0.0048	0.0226		
	0.0069	0.0383		
	0.0085	0.0505		
	0.0108	0.0685		
	0.0129	0.0828		
	0.0158	0.1010		
	0.0180	0.1119		
	0.0201	0.1205		
	0.0253	0.1385		
	0.0338	0.1589		
	0.0439	0.1738		
	0.0745	0.1904		
	0.1127	0.2036		
	0.1718	0.2188		
	0.2498	0.2348		
	0.3132	0.2467		
	0.3656	0.2539		
	0.4570	0.2648		



0.5386	0.2754			
0.5813	0.2801			
0.6836	0.2890			
0.7823	0.2971			
0.8652	0.3036			
1.0053	0.3123			
1.1394	0.3189			
1.3210	0.3232			
1.4672	0.3272			
1.7487	0.3306			
2.0204	0.3337			
2.2910	0.3359			
2.6736	0.3379			
9999				
C ***** JUGO 1 *****				
98IND_R	CARG	0.0	0.0	0
0.0028	0.0104			
0.0048	0.0226			
0.0069	0.0383			
0.0085	0.0505			
0.0108	0.0685			
0.0129	0.0828			
0.0158	0.1010			
0.0180	0.1119			
0.0201	0.1205			
0.0253	0.1385			
0.0338	0.1589			
0.0439	0.1738			
0.0745	0.1904			
0.1127	0.2036			
0.1718	0.2188			
0.2498	0.2348			
0.3132	0.2467			
0.3656	0.2539			
0.4570	0.2648			
0.5386	0.2754			
0.5813	0.2801			
0.6836	0.2890			
0.7823	0.2971			
0.8652	0.3036			
1.0053	0.3123			
1.1394	0.3189			
1.3210	0.3232			
1.4672	0.3272			
1.7487	0.3306			
2.0204	0.3337			
2.2910	0.3359			
2.6736	0.3379			
9999				
C CARG IND_R 325. 0				
C ***** JUGO 2 *****				
98CAP	CARG	0.0	0.0	3
0.0045	0.0104			
0.0077	0.0226			
0.0112	0.0383			
0.0138	0.0505			
0.0175	0.0685			
0.0208	0.0828			
0.0255	0.1010			
0.0291	0.1119			
0.0324	0.1205			
0.0409	0.1385			
0.0544	0.1589			
0.0707	0.1738			
0.1200	0.1904			
0.1817	0.2036			
0.2770	0.2188			

```

0.4027      0.2348
0.5049      0.2467
0.5893      0.2539
0.7367      0.2648
0.8683      0.2754
0.9371      0.2801
1.1021      0.2890
1.2612      0.2971
1.3948      0.3036
1.6207      0.3123
1.8368      0.3189
2.1295      0.3232
2.3652      0.3272
2.8190      0.3306
3.2571      0.3337
3.6932      0.3359
4.3101      0.3379
          9999
C ***** RNS - Curva Experimental *****
98CAP      REA              0.0  0.0              3
0.0325      0.0087
0.0551      0.0188
0.0806      0.0319
0.0990      0.0421
0.1258      0.0571
0.1499      0.0690
0.1838      0.0841
0.2093      0.0933
0.2333      0.1004
0.2941      0.1154
0.3917      0.1324
0.5090      0.1449
0.8640      0.1586
1.3080      0.1697
1.9937      0.1823
2.8987      0.1957
3.6340      0.2056
4.2420      0.2116
5.3025      0.2207
6.2499      0.2295
6.7448      0.2334
7.9325      0.2408
9.0779      0.2476
10.0394     0.2530
11.6655     0.2603
13.2209     0.2657
15.3278     0.2693
17.0246     0.2727
20.2909     0.2755
23.4441     0.2781
26.5832     0.2799
31.0232     0.2816
          9999
      REA      CARG              .3              0
C IND_R CARG              325.              0
C CARG  IND_R              325.              0
      IND_1              1.E6              2
      IND_R1             1.E6              2
      IND_R2             1.E6              2
      REA_1              1.E6              2
      IND_3              1.E6              2
C ***** Ferro - Gap *****
98IND_R CAP              0.0  0.0              3
0.0089      0.0087
0.0152      0.0188
0.0222      0.0319
0.0272      0.0421

```

```

0.0346      0.0571
0.0412      0.0690
0.0505      0.0841
0.0575      0.0933
0.0641      0.1004
0.0808      0.1154
0.1077      0.1324
0.1399      0.1449
0.2375      0.1586
0.3595      0.1697
0.5481      0.1823
0.7968      0.1957
0.9989      0.2056
1.1661      0.2116
1.4576      0.2207
1.7180      0.2295
1.8541      0.2334
2.1806      0.2408
2.4954      0.2476
2.7597      0.2530
3.2067      0.2603
3.6343      0.2657
4.2134      0.2693
4.6799      0.2727
5.5777      0.2755
6.4445      0.2781
7.3074      0.2799
8.5279      0.2816

          9999
IND_R CAP          325.          0
/SWITCH
C < n 1>< n 2>< Tclose ><Top/Tde >< Ie ><Vf/CLOP >< type >
  CARG R3          .0321      1.E3          0
  R4   DEF          -1.        .25          0
/SOURCE
C < n 1><>< Ampl. >< Freq. ><Phase/T0>< A1 >< T1 >< TSTART >< TSTOP >
14FONT 0          311.7      60.          -1.        1.E3
60IND_1 0
60IND_R1 0          1.E3
60IND_R2 0          1.E3
60REA_1 0          1.E3
60IND_3 0          1.E3
/OUTPUT
  CARG  IND_R CAP  CAP  CARG  REA
BLANK TACS
BLANK BRANCH
BLANK SWITCH
BLANK SOURCE
BLANK OUTPUT
BLANK PLOT
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK

```

## 6.15 - Roteiro em ATP da Estrutura Simétrica com elemento 98 e com dual eletromagnético

```

BEGIN NEW DATA CASE
C -----
C Generated by ATPDRAW  abril, segunda-feira 25, 2011
C A Bonneville Power Administration program
C by H. K. Høidalen at SEFAS/NTNU - NORWAY 1994-2006
C -----
C dT >< Tmax >< Xopt >< Copt >
  1.E-6      .5      60.      60.

```

```

500      1      1      1      1      0      0      1      0
/TACS
TACS HYBRID
/TACS
90IND
1RET      +IND      1.      1.E3
      1.
      1.
90CARG
1JUG_2    +CARG      1.      1.E3
      1.
      1.
90CAP
1JUG      +CAP      1.      1.E3
      1.
      1.
90REA
1REA_1    +REA      1.      1.E3
      1.
      1.
90IND_R
1IND_R1   +IND_R      1.      1.E3
      1.
      1.
C      1      2      3      4      5      6      7      8
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
/BRANCH
C < n1 >> n2 >>ref1><ref2>< R >< L >< C >
C < n1 >> n2 >>ref1><ref2>< R >< A >< B ><Leng><><>0
FONT FONT_R      .06      0
FONT_RIND      5.5      3
CARG REA      325.      3
IND_R CAP      .07      3
CAP CARG      2.22E5      3
C ***** Reatância do Gap *****
IND_R IND      3.1      3
C ***** Jugo 1 *****
98CAP CARG      0.0  0.0      3
      0.0030      0.0226
      0.0055      0.0640
      0.0067      0.0930
      0.0085      0.1279
      0.0102      0.1618
      0.0126      0.1941
      0.0153      0.2203
      0.0207      0.2486
      0.0517      0.2845
      0.1385      0.3061
      0.2462      0.3327
      0.3732      0.3569
      0.5135      0.3837
      0.7555      0.4226
      0.9975      0.4556
      1.3910      0.4997
      1.6736      0.5185
      2.6601      0.5438
      3.5283      0.5568
      4.4113      0.5639
      9999
CARG      72.      3
DEF      25.25      3
R3 R4      .001      3
C CARG CAP      325.      3
C CARG CAP      325.      3
C ***** Jugo 2 *****
98CAP IND      0.0  0.0      3
      0.0023      0.0226

```

0.0044	0.0640			
0.0053	0.0930			
0.0067	0.1279			
0.0080	0.1618			
0.0099	0.1941			
0.0121	0.2203			
0.0164	0.2486			
0.0409	0.2845			
0.1095	0.3061			
0.1947	0.3327			
0.2950	0.3569			
0.4060	0.3837			
0.5973	0.4226			
0.7886	0.4556			
1.0997	0.4997			
1.3231	0.5185			
2.1030	0.5438			
2.7894	0.5568			
3.4875	0.5639			
9999				
C ***** Retorno *****				
98IND	CARG	0.0	0.0	3
0.0084	0.0301			
0.0157	0.0853			
0.0188	0.1241			
0.0240	0.1705			
0.0287	0.2158			
0.0355	0.2588			
0.0433	0.2938			
0.0585	0.3315			
0.1462	0.3793			
0.3917	0.4081			
0.6962	0.4436			
1.0550	0.4759			
1.4519	0.5116			
2.1361	0.5634			
2.8203	0.6075			
3.9327	0.6663			
4.7318	0.6913			
7.5207	0.7250			
9.9754	0.7424			
12.4718	0.7519			
9999				
C ***** Jugo 2 *****				
98CAP	IND	0.0	0.0	3
0.0023	0.0226			
0.0044	0.0640			
0.0053	0.0930			
0.0067	0.1279			
0.0080	0.1618			
0.0099	0.1941			
0.0121	0.2203			
0.0164	0.2486			
0.0409	0.2845			
0.1095	0.3061			
0.1947	0.3327			
0.2950	0.3569			
0.4060	0.3837			
0.5973	0.4226			
0.7886	0.4556			
1.0997	0.4997			
1.3231	0.5185			
2.1030	0.5438			
2.7894	0.5568			
3.4875	0.5639			
9999				
C IND	CAP	325.		3

```

C ***** Jugo 1 *****
98CAP  CARG          0.0  0.0          3
      0.0030      0.0226
      0.0055      0.0640
      0.0067      0.0930
      0.0085      0.1279
      0.0102      0.1618
      0.0126      0.1941
      0.0153      0.2203
      0.0207      0.2486
      0.0517      0.2845
      0.1385      0.3061
      0.2462      0.3327
      0.3732      0.3569
      0.5135      0.3837
      0.7555      0.4226
      0.9975      0.4556
      1.3910      0.4997
      1.6736      0.5185
      2.6601      0.5438
      3.5283      0.5568
      4.4113      0.5639
      9999
C ***** caminho médio *****
C ***** RNS *****
98REA  CARG          0.0  0.0          3
      0.0226      0.0117
      0.0424      0.0330
      0.0509      0.0481
      0.0650      0.0661
      0.0778      0.0836
      0.0962      0.1003
      0.1174      0.1138
      0.1584      0.1285
      0.3959      0.1470
      1.0605      0.1581
      1.8849      0.1719
      2.8563      0.1844
      3.9309      0.1982
      5.7833      0.2183
      7.6356      0.2354
      10.6474      0.2582
      12.8108      0.2679
      20.3616      0.2809
      27.0074      0.2877
      33.7663      0.2914
      9999
      REA  CAP          .07          3
C IND  CAP          325.          3
C CARG IND          325.          3
      RET          1.E6          2
      JUG_2        1.E6          2
      JUG          1.E6          2
      REA_1        1.E6          2
      IND_R1       1.E6          2
C ***** Ferro - Gap *****
98CAP  IND          0.0  0.0          3
      0.0084      0.0117
      0.0157      0.0330
      0.0188      0.0481
      0.0240      0.0661
      0.0287      0.0836
      0.0355      0.1003
      0.0433      0.1138
      0.0585      0.1285
      0.1462      0.1470
      0.3917      0.1581

```

```

0.6962      0.1719
1.0550      0.1844
1.4519      0.1982
2.1361      0.2183
2.8203      0.2354
3.9327      0.2582
4.7318      0.2679
7.5207      0.2809
9.9754      0.2877
12.4718     0.2914
          9999
IND  CAP              325.                      3
/SWITCH
C < n 1>< n 2>< Tclose ><Top/Tde >< Ie ><Vf/CLOP >< type >
  CARG R3          .0441      1.E3              0
  R4   DEF         -1.        .25              0
/SOURCE
C < n 1>< >< Ampl. >< Freq. ><Phase/T0>< A1 >< T1 >< TSTART >< TSTOP >
14FONT  0          311.7      60.              -1.      1.E3
60RET   0
60JUG_2 0
60JUG   0
60REA_1 0
60IND_R1 0
/OUTPUT
  CAP  CARG  IND  REA
BLANK TACS
BLANK BRANCH
BLANK SWITCH
BLANK SOURCE
BLANK OUTPUT
BLANK PLOT
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK

```

## 6.16 – Roteiro em ATP da Estrutura Assimétrica com elemento 96 e com dual eletromagnético

```

BEGIN NEW DATA CASE
C -----
C Generated by ATPDRAW maio, quinta-feira 19, 2011
C A Bonneville Power Administration program
C by H. K. Høidalen at SEFAS/NTNU - NORWAY 1994-2006
C -----
C dT >< Tmax >< Xopt >< Copt >
  1.E-6      .5      60.      60.
    500      1      1      1      1      0      0      1      0
/TACS
TACS HYBRID
/TACS
90CAP                      1.E3
90CARG                      1.E3
  1IND_1  +CAP              1.
    1.
    1.
  1IND_2  +CARG              1.
    1.
    1.
90IND_R                      1.E3
  1IND_R1  +IND_R              1.
    1.
    1.
  1IND_R2  +CARG              1.
    1.
    1.
90REA                      1.E3

```

```

1REA_1 +REA 1.
1.
1.
90IND 1.E3
1IND_3 +IND 1.
1.
C 1 2 3 4 5 6 7 8
C 3456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
/BRANCH
C < n1 >< n2 ><ref1><ref2>< R >< L >< C >
C < n1 >< n2 ><ref1><ref2>< R >< A >< B ><Leng><><>0
FONT FONT_R .06 0
FONT RIND_R 5.5 3
IND_R IND .3 3
CAP CARG 2.22E5 3
C ***** Reatância do Gap *****
IND CAP 2.4 3
C ***** Jugo 2 *****
96CAP CARG 0.0 0.0 3
-4.2773 -0.3754
-3.6605 -0.3733
-3.2244 -0.3708
-2.7863 -0.3673
-2.3325 -0.3636
-2.0968 -0.3591
-1.8041 -0.3543
-1.5880 -0.3470
-1.3621 -0.3374
-1.2285 -0.3301
-1.0693 -0.3211
-0.9043 -0.3112
-0.8356 -0.3060
-0.7040 -0.2942
-0.5566 -0.2821
-0.4721 -0.2741
-0.3700 -0.2609
-0.2443 -0.2431
-0.1490 -0.2262
-0.0873 -0.2115
-0.0380 -0.1931
-0.0217 -0.1765
-0.0081 -0.1539
0.0003 -0.1339
0.0037 -0.1244
0.0072 -0.1122
0.0119 -0.0920
0.0152 -0.0761
0.0190 -0.0561
0.0215 -0.0426
0.0251 -0.0251
0.0282 -0.0116
0.0372 0.0116
0.0404 0.0251
0.0439 0.0426
0.0465 0.0561
0.0502 0.0761
0.0535 0.0920
0.0583 0.1122
0.0618 0.1244
0.0651 0.1339
0.0736 0.1539
0.0871 0.1765
0.1034 0.1931
0.1528 0.2115
0.2144 0.2262
0.3097 0.2431

```



0.4354	0.2609			
0.5376	0.2741			
0.6221	0.2821			
0.7694	0.2942			
0.9010	0.3060			
0.9698	0.3112			
1.1348	0.3211			
1.2939	0.3301			
1.4275	0.3374			
1.6534	0.3470			
1.8695	0.3543			
2.1622	0.3591			
2.3979	0.3636			
2.8517	0.3673			
3.2898	0.3708			
3.7259	0.3733			
4.3428	0.3754			
	9999			
CARG		72.		3
DEF		25.25		3
R3	R4	.001		3
C	*****	Retorno	*****	*****
96IND_R	CARG	0.0	0.0	3
-8.4632	-0.3754			
-7.2427	-0.3733			
-6.3798	-0.3708			
-5.5130	-0.3673			
-4.6151	-0.3636			
-4.1487	-0.3591			
-3.5695	-0.3543			
-3.1420	-0.3470			
-2.6950	-0.3374			
-2.4307	-0.3301			
-2.1158	-0.3211			
-1.7893	-0.3112			
-1.6533	-0.3060			
-1.3928	-0.2942			
-1.1013	-0.2821			
-0.9342	-0.2741			
-0.7321	-0.2609			
-0.4833	-0.2431			
-0.2948	-0.2262			
-0.1727	-0.2115			
-0.0752	-0.1931			
-0.0429	-0.1765			
-0.0161	-0.1539			
0.0006	-0.1339			
0.0072	-0.1244			
0.0142	-0.1122			
0.0235	-0.0920			
0.0302	-0.0761			
0.0375	-0.0561			
0.0426	-0.0426			
0.0496	-0.0251			
0.0558	-0.0116			
0.0737	0.0116			
0.0799	0.0251			
0.0869	0.0426			
0.0920	0.0561			
0.0993	0.0761			
0.1060	0.0920			
0.1153	0.1122			
0.1223	0.1244			
0.1289	0.1339			
0.1456	0.1539			
0.1724	0.1765			
0.2047	0.1931			

0.3022	0.2115
0.4243	0.2262
0.6128	0.2431
0.8616	0.2609
1.0637	0.2741
1.2308	0.2821
1.5223	0.2942
1.7828	0.3060
1.9188	0.3112
2.2453	0.3211
2.5602	0.3301
2.8245	0.3374
3.2715	0.3470
3.6990	0.3543
4.2782	0.3591
4.7446	0.3636
5.6425	0.3673
6.5093	0.3708
7.3722	0.3733
8.5927	0.3754

9999

C \*\*\*\*\* Jugo 2 \*\*\*\*\*

96CAP CARG 0.0 0.0 3

-4.2773	-0.3754
-3.6605	-0.3733
-3.2244	-0.3708
-2.7863	-0.3673
-2.3325	-0.3636
-2.0968	-0.3591
-1.8041	-0.3543
-1.5880	-0.3470
-1.3621	-0.3374
-1.2285	-0.3301
-1.0693	-0.3211
-0.9043	-0.3112
-0.8356	-0.3060
-0.7040	-0.2942
-0.5566	-0.2821
-0.4721	-0.2741
-0.3700	-0.2609
-0.2443	-0.2431
-0.1490	-0.2262
-0.0873	-0.2115
-0.0380	-0.1931
-0.0217	-0.1765
-0.0081	-0.1539
0.0003	-0.1339
0.0037	-0.1244
0.0072	-0.1122
0.0119	-0.0920
0.0152	-0.0761
0.0190	-0.0561
0.0215	-0.0426
0.0251	-0.0251
0.0282	-0.0116
0.0372	0.0116
0.0404	0.0251
0.0439	0.0426
0.0465	0.0561
0.0502	0.0761
0.0535	0.0920
0.0583	0.1122
0.0618	0.1244
0.0651	0.1339
0.0736	0.1539
0.0871	0.1765
0.1034	0.1931

0.1528	0.2115		
0.2144	0.2262		
0.3097	0.2431		
0.4354	0.2609		
0.5376	0.2741		
0.6221	0.2821		
0.7694	0.2942		
0.9010	0.3060		
0.9698	0.3112		
1.1348	0.3211		
1.2939	0.3301		
1.4275	0.3374		
1.6534	0.3470		
1.8695	0.3543		
2.1622	0.3591		
2.3979	0.3636		
2.8517	0.3673		
3.2898	0.3708		
3.7259	0.3733		
4.3428	0.3754		
9999			
REA	CARG	.3	0
IND_1		1.E6	2
IND_2		1.E6	2
IND_R1		1.E6	2
IND_R2		1.E6	2
REA_1		1.E6	2
IND_3		1.E6	2
C ***** RNS *****			
C ***** Curva B x H - Experimento *****			
96CAP	REA	0.0 0.0	3
	-30.7876	-0.2816	
	-26.3477	-0.2799	
	-23.2086	-0.2781	
	-20.0554	-0.2755	
	-16.7890	-0.2727	
	-15.0922	-0.2693	
	-12.9854	-0.2657	
	-11.4300	-0.2603	
	-9.8039	-0.2530	
	-8.8423	-0.2476	
	-7.6970	-0.2408	
	-6.5092	-0.2334	
	-6.0143	-0.2295	
	-5.0670	-0.2207	
	-4.0065	-0.2116	
	-3.3984	-0.2056	
	-2.6632	-0.1957	
	-1.7582	-0.1823	
	-1.0724	-0.1697	
	-0.6284	-0.1586	
	-0.2735	-0.1449	
	-0.1561	-0.1324	
	-0.0586	-0.1154	
	0.0022	-0.1004	
	0.0263	-0.0933	
	0.0517	-0.0841	
	0.0857	-0.0690	
	0.1097	-0.0571	
	0.1366	-0.0421	
	0.1550	-0.0319	
	0.1804	-0.0188	
	0.2030	-0.0087	
	0.2681	0.0087	
	0.2907	0.0188	
	0.3161	0.0319	
	0.3345	0.0421	

0.3614	0.0571
0.3854	0.0690
0.4194	0.0841
0.4448	0.0933
0.4689	0.1004
0.5297	0.1154
0.6272	0.1324
0.7446	0.1449
1.0995	0.1586
1.5435	0.1697
2.2293	0.1823
3.1343	0.1957
3.8695	0.2056
4.4776	0.2116
5.5381	0.2207
6.4854	0.2295
6.9803	0.2334
8.1681	0.2408
9.3134	0.2476
10.2750	0.2530
11.9011	0.2603
13.4565	0.2657
15.5633	0.2693
17.2601	0.2727
20.5265	0.2755
23.6797	0.2781
26.8188	0.2799
31.2587	0.2816

9999

C \*\*\*\*\* Jugo 1 \*\*\*\*\*

96IND_R CARG	0.0	0.0	3
-2.6533	-0.3754		
-2.2707	-0.3733		
-2.0001	-0.3708		
-1.7284	-0.3673		
-1.4469	-0.3636		
-1.3007	-0.3591		
-1.1191	-0.3543		
-0.9850	-0.3470		
-0.8449	-0.3374		
-0.7620	-0.3301		
-0.6633	-0.3211		
-0.5610	-0.3112		
-0.5183	-0.3060		
-0.4367	-0.2942		
-0.3453	-0.2821		
-0.2929	-0.2741		
-0.2295	-0.2609		
-0.1515	-0.2431		
-0.0924	-0.2262		
-0.0542	-0.2115		
-0.0236	-0.1931		
-0.0135	-0.1765		
-0.0050	-0.1539		
0.0002	-0.1339		
0.0023	-0.1244		
0.0045	-0.1122		
0.0074	-0.0920		
0.0095	-0.0761		
0.0118	-0.0561		
0.0134	-0.0426		
0.0155	-0.0251		
0.0175	-0.0116		
0.0231	0.0116		
0.0251	0.0251		
0.0272	0.0426		
0.0288	0.0561		

0.0311	0.0761
0.0332	0.0920
0.0361	0.1122
0.0383	0.1244
0.0404	0.1339
0.0456	0.1539
0.0541	0.1765
0.0642	0.1931
0.0948	0.2115
0.1330	0.2262
0.1921	0.2431
0.2701	0.2609
0.3335	0.2741
0.3859	0.2821
0.4773	0.2942
0.5589	0.3060
0.6016	0.3112
0.7039	0.3211
0.8026	0.3301
0.8855	0.3374
1.0256	0.3470
1.1597	0.3543
1.3413	0.3591
1.4875	0.3636
1.7690	0.3673
2.0407	0.3708
2.3113	0.3733
2.6939	0.3754

9999

C \*\*\*\*\* Jugo 1 \*\*\*\*\*

96IND_R CARG	0.0	0.0	3
-2.6533	-0.3754		
-2.2707	-0.3733		
-2.0001	-0.3708		
-1.7284	-0.3673		
-1.4469	-0.3636		
-1.3007	-0.3591		
-1.1191	-0.3543		
-0.9850	-0.3470		
-0.8449	-0.3374		
-0.7620	-0.3301		
-0.6633	-0.3211		
-0.5610	-0.3112		
-0.5183	-0.3060		
-0.4367	-0.2942		
-0.3453	-0.2821		
-0.2929	-0.2741		
-0.2295	-0.2609		
-0.1515	-0.2431		
-0.0924	-0.2262		
-0.0542	-0.2115		
-0.0236	-0.1931		
-0.0135	-0.1765		
-0.0050	-0.1539		
0.0002	-0.1339		
0.0023	-0.1244		
0.0045	-0.1122		
0.0074	-0.0920		
0.0095	-0.0761		
0.0118	-0.0561		
0.0134	-0.0426		
0.0155	-0.0251		
0.0175	-0.0116		
0.0231	0.0116		
0.0251	0.0251		
0.0272	0.0426		
0.0288	0.0561		

0.0311	0.0761
0.0332	0.0920
0.0361	0.1122
0.0383	0.1244
0.0404	0.1339
0.0456	0.1539
0.0541	0.1765
0.0642	0.1931
0.0948	0.2115
0.1330	0.2262
0.1921	0.2431
0.2701	0.2609
0.3335	0.2741
0.3859	0.2821
0.4773	0.2942
0.5589	0.3060
0.6016	0.3112
0.7039	0.3211
0.8026	0.3301
0.8855	0.3374
1.0256	0.3470
1.1597	0.3543
1.3413	0.3591
1.4875	0.3636
1.7690	0.3673
2.0407	0.3708
2.3113	0.3733
2.6939	0.3754

9999

C \*\*\*\*\* Ferro - Gap \*\*\*\*\*  
 96IND\_R CAP 0.0 0.0 3

-8.4632	-0.2816
-7.2427	-0.2799
-6.3798	-0.2781
-5.5130	-0.2755
-4.6151	-0.2727
-4.1487	-0.2693
-3.5695	-0.2657
-3.1420	-0.2603
-2.6950	-0.2530
-2.4307	-0.2476
-2.1158	-0.2408
-1.7893	-0.2334
-1.6533	-0.2295
-1.3928	-0.2207
-1.1013	-0.2116
-0.9342	-0.2056
-0.7321	-0.1957
-0.4833	-0.1823
-0.2948	-0.1697
-0.1727	-0.1586
-0.0752	-0.1449
-0.0429	-0.1324
-0.0161	-0.1154
0.0006	-0.1004
0.0072	-0.0933
0.0142	-0.0841
0.0235	-0.0690
0.0302	-0.0571
0.0375	-0.0421
0.0426	-0.0319
0.0496	-0.0188
0.0558	-0.0087
0.0737	0.0087
0.0799	0.0188
0.0869	0.0319
0.0920	0.0421

```

0.0993      0.0571
0.1060      0.0690
0.1153      0.0841
0.1223      0.0933
0.1289      0.1004
0.1456      0.1154
0.1724      0.1324
0.2047      0.1449
0.3022      0.1586
0.4243      0.1697
0.6128      0.1823
0.8616      0.1957
1.0637      0.2056
1.2308      0.2116
1.5223      0.2207
1.7828      0.2295
1.9188      0.2334
2.2453      0.2408
2.5602      0.2476
2.8245      0.2530
3.2715      0.2603
3.6990      0.2657
4.2782      0.2693
4.7446      0.2727
5.6425      0.2755
6.5093      0.2781
7.3722      0.2799
8.5927      0.2816

          9999
/SWITCH
C < n 1><< n 2>> Tclose ><Top/Tde >< Ie ><Vf/CLOP >< type >
  CARG R3      .0321      1.E3
  R4 DEF      -1.      .25
/SOURCE
C < n 1><<> Ampl. >< Freq. ><Phase/T0>< A1 >< T1 >< TSTART >< TSTOP >
14FONT 0      311.7      60.      -1.      1.E3
60IND_1 0
60IND_2 0
60IND_R1 0
60IND_R2 0
60REA_1 0
60IND_3 0
/OUTPUT
  CARG IND_R CAP CAP CARG REA
BLANK TACS
BLANK BRANCH
BLANK SWITCH
BLANK SOURCE
BLANK OUTPUT
BLANK PLOT
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK

```

## 6.17 - Roteiro em ATP da Estrutura Simétrica com elemento 96 e com dual eletromagnético

```

BEGIN NEW DATA CASE
C -----
C Generated by ATPDRAW maio, quarta-feira 18, 2011
C A Bonneville Power Administration program
C by H. K. Høidalen at SEFAS/NTNU - NORWAY 1994-2006
C -----
C dT >< Tmax >< Xopt >< Copt >
  1.E-6      .5      60.      60.

```

```

500      1      1      1      1      0      0      1      0
/TACS
TACS HYBRID
/TACS
90IND
1RET      +IND      1.      1.E3
      1.
      1.
90CARG
1JUG_2    +CARG      1.      1.E3
      1.
      1.
90CAP
1JUG      +CAP      1.      1.E3
      1.
      1.
90REA
1REA_1    +REA      1.      1.E3
      1.
      1.
90IND_R
1IND_R1   +IND_R      1.      1.E3
      1.
      1.
C      1      2      3      4      5      6      7      8
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
/BRANCH
C < n1 >> n2 >>ref1><ref2>< R >< L >< C >
C < n1 >> n2 >>ref1><ref2>< R >< A >< B ><Leng><><>0
FONT FONT_R      .06      0
FONT RIND      5.5      3
C ***** Jugo 2 *****
96IND CAP      0.0      0.0      3
      -3.4699      -0.5639
      -2.7718      -0.5568
      -2.0854      -0.5438
      -1.3055      -0.5185
      -1.0821      -0.4997
      -0.7710      -0.4556
      -0.5797      -0.4226
      -0.3884      -0.3837
      -0.2774      -0.3569
      -0.1771      -0.3327
      -0.0919      -0.3061
      -0.0233      -0.2845
      0.0013      -0.2486
      0.0055      -0.2203
      0.0077      -0.1941
      0.0096      -0.1618
      0.0109      -0.1279
      0.0124      -0.0930
      0.0132      -0.0640
      0.0153      -0.0226
      0.0200      0.0226
      0.0220      0.0640
      0.0229      0.0930
      0.0243      0.1279
      0.0256      0.1618
      0.0275      0.1941
      0.0297      0.2203
      0.0340      0.2486
      0.0585      0.2845
      0.1271      0.3061
      0.2123      0.3327
      0.3126      0.3569
      0.4236      0.3837
      0.6149      0.4226

```



0.8062	0.4556				
1.1173	0.4997				
1.3408	0.5185				
2.1206	0.5438				
2.8070	0.5568				
3.5051	0.5639				
	9999				
IND_R	CAP	.07			3
CAP	CARG		2.22E5		3
C	***** Reatância - Gap *****				
IND	IND_R	3.1			3
C	***** Retorno *****				
96IND	CARG	0.0	0.0		3
	-12.4088		-0.7519		
	-9.9124		-0.7424		
	-7.4577		-0.7250		
	-4.6688		-0.6913		
	-3.8697		-0.6663		
	-2.7573		-0.6075		
	-2.0731		-0.5634		
	-1.3889		-0.5116		
	-0.9920		-0.4759		
	-0.6332		-0.4436		
	-0.3287		-0.4081		
	-0.0832		-0.3793		
	0.0045		-0.3315		
	0.0197		-0.2938		
	0.0275		-0.2588		
	0.0343		-0.2158		
	0.0390		-0.1705		
	0.0442		-0.1241		
	0.0473		-0.0853		
	0.0546		-0.0301		
	0.0714		0.0301		
	0.0787		0.0853		
	0.0818		0.1241		
	0.0870		0.1705		
	0.0917		0.2158		
	0.0985		0.2588		
	0.1063		0.2938		
	0.1215		0.3315		
	0.2092		0.3793		
	0.4547		0.4081		
	0.7592		0.4436		
	1.1180		0.4759		
	1.5149		0.5116		
	2.1991		0.5634		
	2.8833		0.6075		
	3.9957		0.6663		
	4.7948		0.6913		
	7.5837		0.7250		
	10.0384		0.7424		
	12.5348		0.7519		
	9999				
CARG		72.			3
DEF		25.25			3
R3	R4	.001			3
C	***** Jugo 2 *****				
96IND	CAP	0.0	0.0		3
	-3.4699		-0.5639		
	-2.7718		-0.5568		
	-2.0854		-0.5438		
	-1.3055		-0.5185		
	-1.0821		-0.4997		
	-0.7710		-0.4556		
	-0.5797		-0.4226		
	-0.3884		-0.3837		

-0.2774	-0.3569
-0.1771	-0.3327
-0.0919	-0.3061
-0.0233	-0.2845
0.0013	-0.2486
0.0055	-0.2203
0.0077	-0.1941
0.0096	-0.1618
0.0109	-0.1279
0.0124	-0.0930
0.0132	-0.0640
0.0153	-0.0226
0.0200	0.0226
0.0220	0.0640
0.0229	0.0930
0.0243	0.1279
0.0256	0.1618
0.0275	0.1941
0.0297	0.2203
0.0340	0.2486
0.0585	0.2845
0.1271	0.3061
0.2123	0.3327
0.3126	0.3569
0.4236	0.3837
0.6149	0.4226
0.8062	0.4556
1.1173	0.4997
1.3408	0.5185
2.1206	0.5438
2.8070	0.5568
3.5051	0.5639

9999

C \*\*\*\*\* Jugo 1 \*\*\*\*\*  
 96CARG CAP 0.0 0.0 3

-4.3890	-0.5639
-3.5060	-0.5568
-2.6378	-0.5438
-1.6514	-0.5185
-1.3687	-0.4997
-0.9753	-0.4556
-0.7333	-0.4226
-0.4913	-0.3837
-0.3509	-0.3569
-0.2240	-0.3327
-0.1163	-0.3061
-0.0294	-0.2845
0.0016	-0.2486
0.0070	-0.2203
0.0097	-0.1941
0.0121	-0.1618
0.0138	-0.1279
0.0156	-0.0930
0.0167	-0.0640
0.0193	-0.0226
0.0252	0.0226
0.0278	0.0640
0.0289	0.0930
0.0308	0.1279
0.0324	0.1618
0.0348	0.1941
0.0376	0.2203
0.0430	0.2486
0.0740	0.2845
0.1608	0.3061
0.2685	0.3327
0.3954	0.3569

```

0.5358      0.3837
0.7778      0.4226
1.0198      0.4556
1.4133      0.4997
1.6959      0.5185
2.6824      0.5438
3.5506      0.5568
4.4336      0.5639
          9999
C ***** Jugo 1 *****
96CARG  CAP          0.0  0.0          3
-4.3890      -0.5639
-3.5060      -0.5568
-2.6378      -0.5438
-1.6514      -0.5185
-1.3687      -0.4997
-0.9753      -0.4556
-0.7333      -0.4226
-0.4913      -0.3837
-0.3509      -0.3569
-0.2240      -0.3327
-0.1163      -0.3061
-0.0294      -0.2845
0.0016       -0.2486
0.0070       -0.2203
0.0097       -0.1941
0.0121       -0.1618
0.0138       -0.1279
0.0156       -0.0930
0.0167       -0.0640
0.0193       -0.0226
0.0252        0.0226
0.0278        0.0640
0.0289        0.0930
0.0308        0.1279
0.0324        0.1618
0.0348        0.1941
0.0376        0.2203
0.0430        0.2486
0.0740        0.2845
0.1608        0.3061
0.2685        0.3327
0.3954        0.3569
0.5358        0.3837
0.7778        0.4226
1.0198        0.4556
1.4133        0.4997
1.6959        0.5185
2.6824        0.5438
3.5506        0.5568
4.4336        0.5639
          9999
C ***** RNS *****
96CARG  REA          0.0  0.0          3
-33.7033     -0.2914
-26.9444     -0.2877
-20.2986     -0.2809
-12.7478     -0.2679
-10.5844     -0.2582
-7.5726      -0.2354
-5.7203      -0.2183
-3.8679      -0.1982
-2.7933      -0.1844
-1.8219      -0.1719
-0.9975      -0.1581
-0.3329      -0.1470
-0.0954      -0.1285

```

-0.0544	-0.1138			
-0.0332	-0.1003			
-0.0148	-0.0836			
-0.0020	-0.0661			
0.0121	-0.0481			
0.0206	-0.0330			
0.0404	-0.0117			
0.0856	0.0117			
0.1054	0.0330			
0.1139	0.0481			
0.1280	0.0661			
0.1408	0.0836			
0.1592	0.1003			
0.1804	0.1138			
0.2214	0.1285			
0.4589	0.1470			
1.1235	0.1581			
1.9479	0.1719			
2.9193	0.1844			
3.9939	0.1982			
5.8463	0.2183			
7.6986	0.2354			
10.7104	0.2582			
12.8738	0.2679			
20.4246	0.2809			
27.0704	0.2877			
33.8293	0.2914			
	9999			
REA	CAP	.07		3
RET		1.E6		2
JUG_2		1.E6		2
JUG		1.E6		2
REA_1		1.E6		2
IND_R1		1.E6		2
C ***** Ferro - Gap *****				
96IND	CAP	0.0	0.0	3
-12.4088	-0.2914			
-9.9124	-0.2877			
-7.4577	-0.2809			
-4.6688	-0.2679			
-3.8697	-0.2582			
-2.7573	-0.2354			
-2.0731	-0.2183			
-1.3889	-0.1982			
-0.9920	-0.1844			
-0.6332	-0.1719			
-0.3287	-0.1581			
-0.0832	-0.1470			
0.0045	-0.1285			
0.0197	-0.1138			
0.0275	-0.1003			
0.0343	-0.0836			
0.0390	-0.0661			
0.0442	-0.0481			
0.0473	-0.0330			
0.0546	-0.0117			
0.0714	0.0117			
0.0787	0.0330			
0.0818	0.0481			
0.0870	0.0661			
0.0917	0.0836			
0.0985	0.1003			
0.1063	0.1138			
0.1215	0.1285			
0.2092	0.1470			
0.4547	0.1581			
0.7592	0.1719			

```

1.1180      0.1844
1.5149      0.1982
2.1991      0.2183
2.8833      0.2354
3.9957      0.2582
4.7948      0.2679
7.5837      0.2809
10.0384     0.2877
12.5348     0.2914
          9999
/SWITCH
C < n 1>< n 2>< Tclose ><Top/Tde >< Ie ><Vf/CLOP >< type >
  CARG R3      .0441      1.E3
  R4  DEF      -1.        .25
/SOURCE
C < n 1>< Ampl. >< Freq. ><Phase/T0>< A1 >< T1 >< TSTART >< TSTOP >
14FONT  0      311.7      60.          -1.        1.E3
60RET   0
60JUG_2 0
60JUG   0
60REA_1 0
60IND_R1 0
/OUTPUT
  CAP  CARG  IND  REA
BLANK TACS
BLANK BRANCH
BLANK SWITCH
BLANK SOURCE
BLANK OUTPUT
BLANK PLOT
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK

```

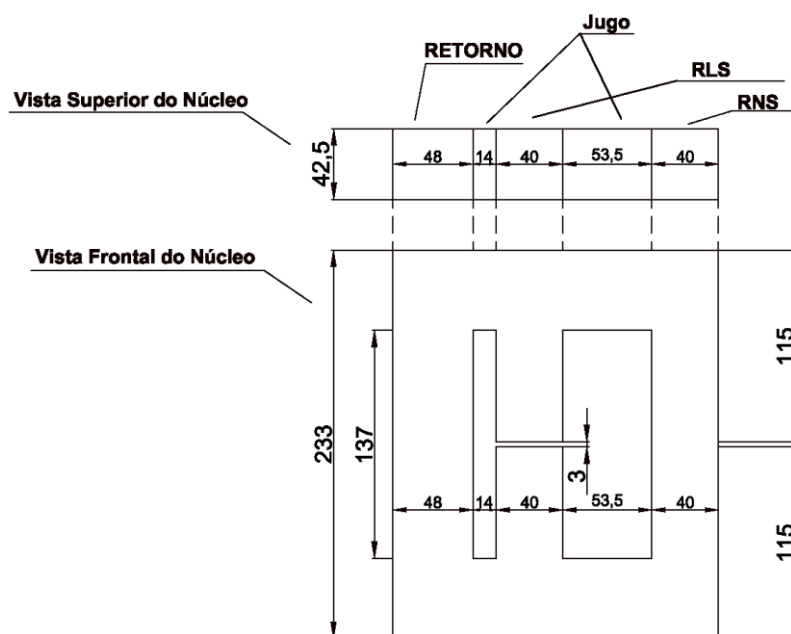
## ANEXOS

### 7.1 – Parâmetros elétricos de células capacitivas

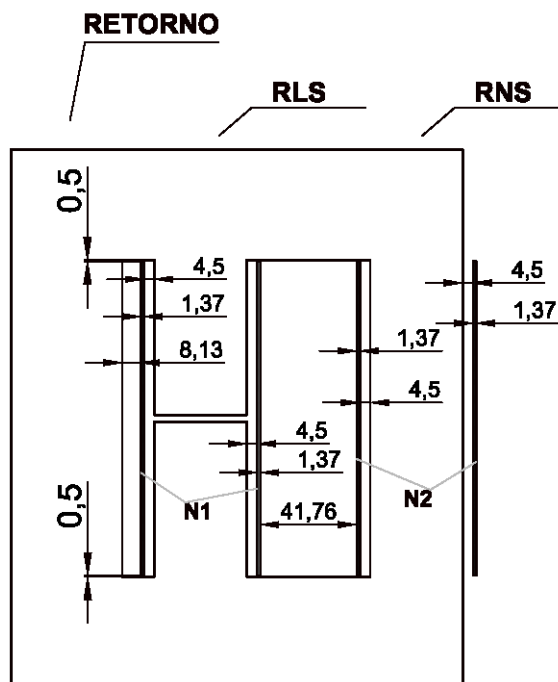
**Tabela 7.1** – Parâmetros elétricos do Capacitor.

<i>Potência Nominal</i>	<i>300kvar</i>	<i>400kvar</i>
<b>Potência máxima de funcionamento (kVAr)</b>	432	576
<b>Tensão nominal (kV)</b>	4,16	8,66
<b>Tensão máxima de funcionamento (kV)</b>	4,576	9,526
<b>Corrente nominal (A)</b>	72,12	46,2
<b>Capacitância nominal (<math>\mu</math>F)</b>	45,9	14,1
<b>Impedância <math>X_c</math> (<math>\Omega</math>)</b>	57,69	187,49

### 7.2 – Desenho de projeto da Estrutura Assimétrica do protótipo de bancada – ARMTRS – 380V



**Figura 7.1** – Desenho das dimensões físicas de projeto do protótipo de bancada 380V para a Estrutura Assimétrica (todas as unidades estão em milímetros).

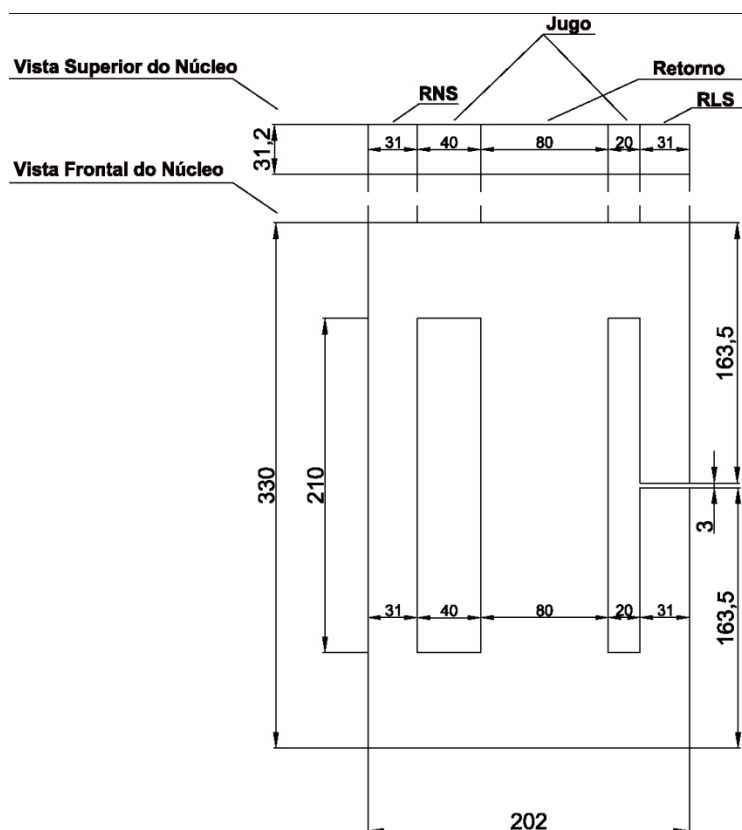


**Figura 7.2** – Desenho da arquitetura dos enrolamentos do protótipo de bancada 380V para a Estrutura Assimétrica (todas as unidades estão em milímetros).

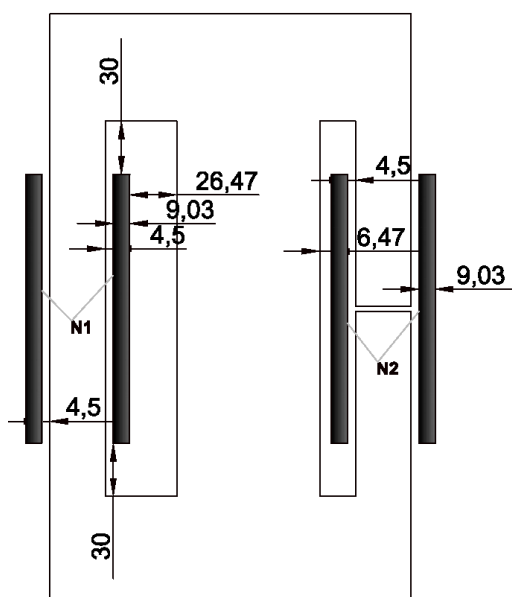
**Dados de projeto:**

- Núcleo constituído com chapas de aço silicioso de grão orientado com 0,27mm de espessura (M125-27-E-004);
- Tensão de saturação:  $60V_{\text{Pico}}$ ;
- Coluna do RNS, RLS, Retorno e jugo com seção transversal retangular;
- O enrolamento N1 envolve a bobina do RNS e é formado por 100 espiras disposta em uma camada composta por um condutor (16 AWG) com seção circular de  $1,31\text{mm}^2$  e com diâmetro de 1,37 mm;
- O enrolamento N2 envolve a bobina do RLS e é formado por 100 espiras disposta em uma camada composta por um condutor (16 AWG) com seção circular de  $1,31\text{mm}^2$  e com diâmetro de 1,37 mm;
- Massa total de ferro é de 11,2 kg e a massa total de cobre é de 0,388 kg.

### 7.3 – Desenho de projeto da Estrutura Simétrica do protótipo de bancada – ARMTRS – 380V



**Figura 7.3** – Desenho das dimensões físicas de projeto do protótipo de bancada 380V para a Estrutura Assimétrica (todas as unidades estão em milímetros).



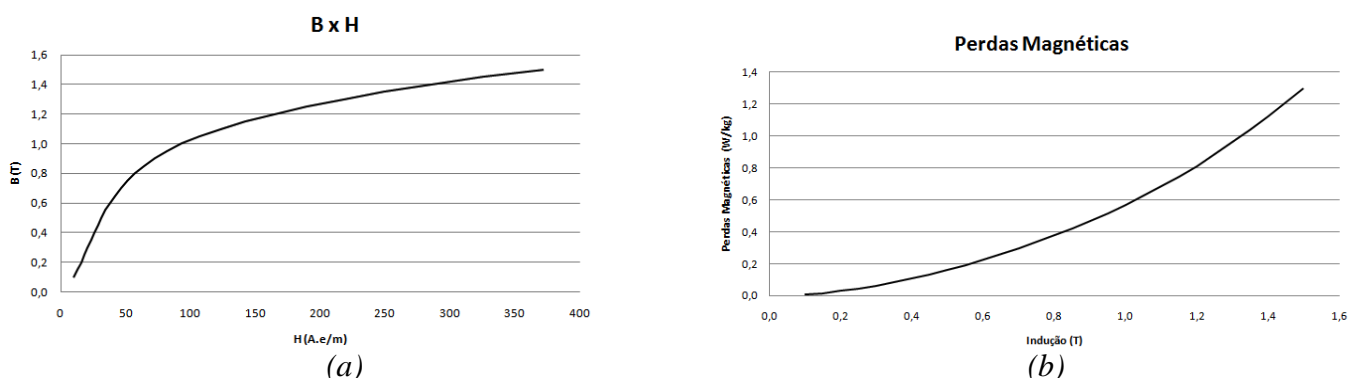
**Figura 7.4** – Desenho da arquitetura dos enrolamentos do protótipo de bancada 380V para a Estrutura Assimétrica (todas as unidades estão em milímetros).



**Dados de projeto:**

- Núcleo constituído com chapas de aço silicioso de grão orientado com 0,30mm de espessura (M125-27-E-004);
- Tensão de saturação: 55 V<sub>Pico</sub>;
- Coluna do RNS, RLS, Retorno e jugo com seção transversal retangular;
- O enrolamento N1 envolve a bobina do RNS e é formado por 132 espiras disposta em três camadas compostas por um condutor (9 AWG) com seção circular de 6,634 mm<sup>2</sup> e com diâmetro de 3,01 mm;
- O enrolamento N2 envolve a bobina do RLS e é formado por 132 espiras com uma camada composta por um condutor (9 AWG) com seção circular de 6,634 mm<sup>2</sup> e com diâmetro de 3,01 mm;
- Massa total de ferro é de 12,4 kg e a massa total de cobre é de 3,3 kg.

### 7.4 - Curva de Magnetização e perdas do protótipo de bancada - 380V fornecida pelo fabricante



**Figura 7.5** – (a) Curva de magnetização ( $B \times H$ ) e (b) Curva de perdas magnéticas.

**Tabela 7.2** - Curva  $B \times H$  e de perdas fornecida pelo fabricante com 29 pontos.

<b>Curva <math>B \times H</math></b>				<b>Curva de Perdas</b>			
<b>B (T)</b>	<b>H(A.m/e)</b>	<b>B (T)</b>	<b>H(A.m/e)</b>	<b>Ps (W/kg)</b>	<b>B (T)</b>	<b>Ps (W/kg)</b>	<b>B (T)</b>
<b>0,100</b>	9,478	0,850	63,937	0,0070	0,100	0,4204	0,850
<b>0,150</b>	12,682	0,900	72,222	0,0160	0,150	0,4666	0,900
<b>0,200</b>	15,619	0,950	81,940	0,0284	0,200	0,5161	0,950
<b>0,250</b>	18,282	1,000	93,256	0,0439	0,250	0,5679	1,000
<b>0,299</b>	20,884	1,050	107,180	0,0624	0,299	0,6242	1,050
<b>0,350</b>	23,406	1,100	123,120	0,0837	0,350	0,6836	1,100
<b>0,400</b>	25,901	1,149	141,820	0,1074	0,400	0,7467	1,149
<b>0,450</b>	28,574	1,200	163,870	0,1331	0,450	0,8123	1,200
<b>0,500</b>	31,345	1,250	189,110	0,1616	0,500	0,8839	1,250

<b>0,550</b>	34,408	1,301	217,450		0,1923	0,550	0,9602	1,301
<b>0,600</b>	37,855	1,350	249,050		0,2251	0,600	1,0387	1,350
<b>0,650</b>	41,651	1,400	284,420		0,2594	0,650	1,1219	1,400
<b>0,700</b>	46,185	1,450	325,030		0,2966	0,700	1,2127	1,450
<b>0,750</b>	51,111	1,500	371,820		0,3352	0,750	1,3019	1,500
<b>0,800</b>	57,088				0,3767	0,800		

## 7.5 – Resultados de ensaio para obtenção das características da impedância equivalente do sistema

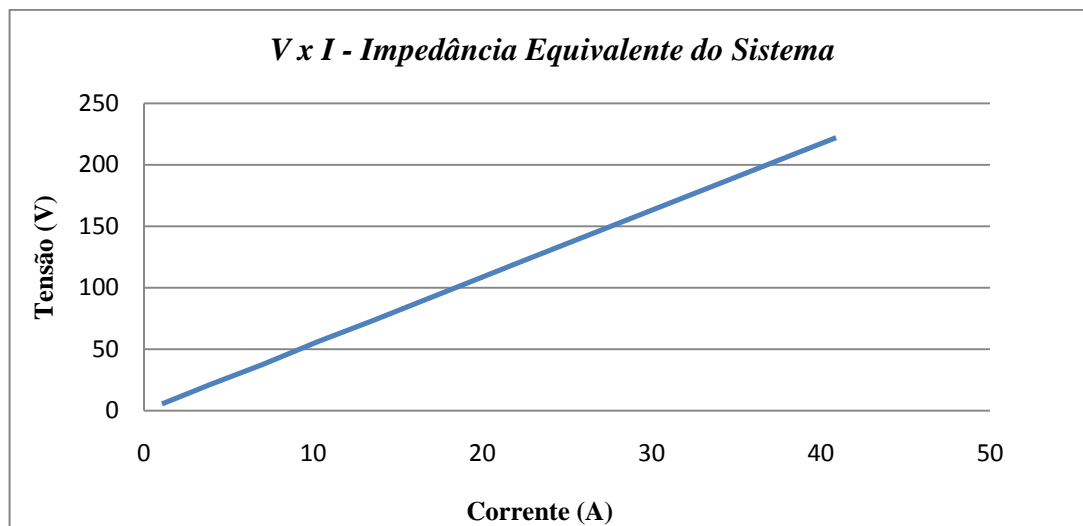
O ensaio para a obtenção das características da impedância equivalente foi realizado conforme descrito em [3].

Equipamento usado para medições:

- Multímetros FLUKE tipo 289;

**Tabela 7.3** – Resultado das medidas do ensaio para obter a reatância equivalente do sistema.

	<i>Tensão nos terminais do RLS – (<math>V_{RMS}</math>)</i>	<i>Corrente no circuito – (<math>A_{RMS}</math>)</i>	<i>Reatância Equivalente do Sistema (<math>\Omega</math>)</i>
<b>Medida 1</b>	5,55	1,07	5,19
<b>Medida 2</b>	21,77	3,98	5,47
<b>Medida 3</b>	37,53	7,00	5,36
<b>Medida 4</b>	56,22	10,30	5,46
<b>Medida 5</b>	73,3	13,50	5,43
<b>Medida 6</b>	89,7	16,50	5,44
<b>Medida 7</b>	106,6	19,60	5,44
<b>Medida 8</b>	121,3	22,30	5,44
<b>Medida 9</b>	222,13	40,90	5,43
<b>Média</b>			5,44



**Figura 7.6 - Característica  $v \times i$  da impedância equivalente do sistema.**

## **7.6 - Resultados de ensaio para obtenção da resistência que representa a carga do sistema**

O ensaio para a obtenção da característica da resistência que representa a carga foi realizado conforme descrito em [3].

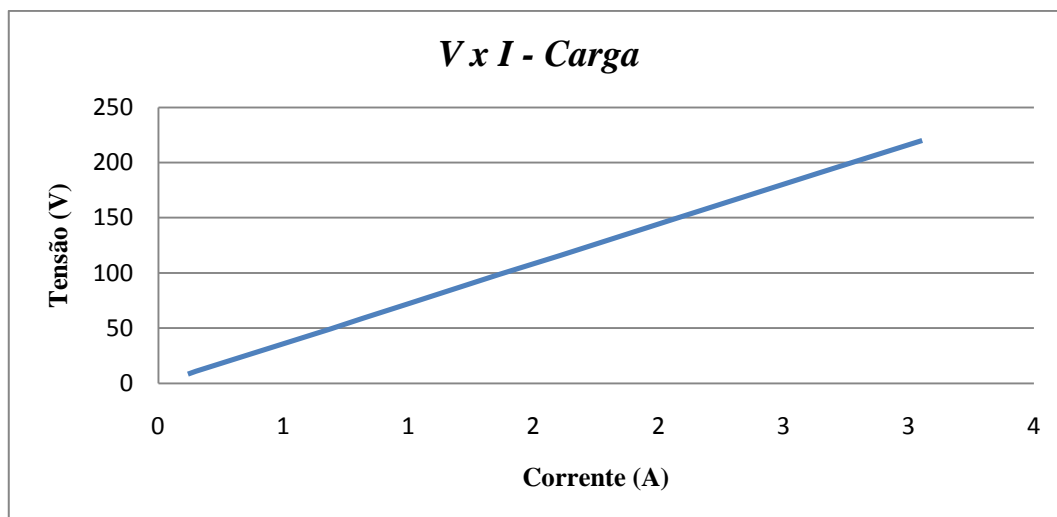
Equipamento usado para medições:

- Multímetros FLUKE tipo 289;

**Tabela 7.4 – Resultado das medidas do ensaio para obter a resistência que representa a carga do sistema.**

	<b><i>Tensão nos terminais da carga – (<math>V_{RMS}</math>)</i></b>	<b><i>Corrente no circuito – (<math>A_{RMS}</math>)</i></b>	<b><i>Resistência da carga (<math>\Omega</math>)</i></b>
<b>Medida 1</b>	8,40	0,12	71,13
<b>Medida 2</b>	10,90	0,15	72,67
<b>Medida 3</b>	25,30	0,35	71,43
<b>Medida 4</b>	49,50	0,69	71,56
<b>Medida 5</b>	58,90	0,82	72,24
<b>Medida 6</b>	72,70	1,01	72,19
<b>Medida 7</b>	98,90	1,37	72,45
<b>Medida 8</b>	115,90	1,61	72,08

<b>Medida 9</b>	150,60	2,09	72,16
<b>Medida 10</b>	190,80	2,64	72,19
<b>Medida 11</b>	219,90	3,05	72,03
<b>Média</b>			72,16



**Figura 7.7-** Característica  $v \times i$  da carga.

## 7.7 – Resultados de ensaio para obtenção da resistência que representa o defeito

O ensaio para a obtenção da característica da resistência que representa o defeito foi realizado conforme descrito em [3] e os resultados mostram as características das duas resistências usadas em paralelo.

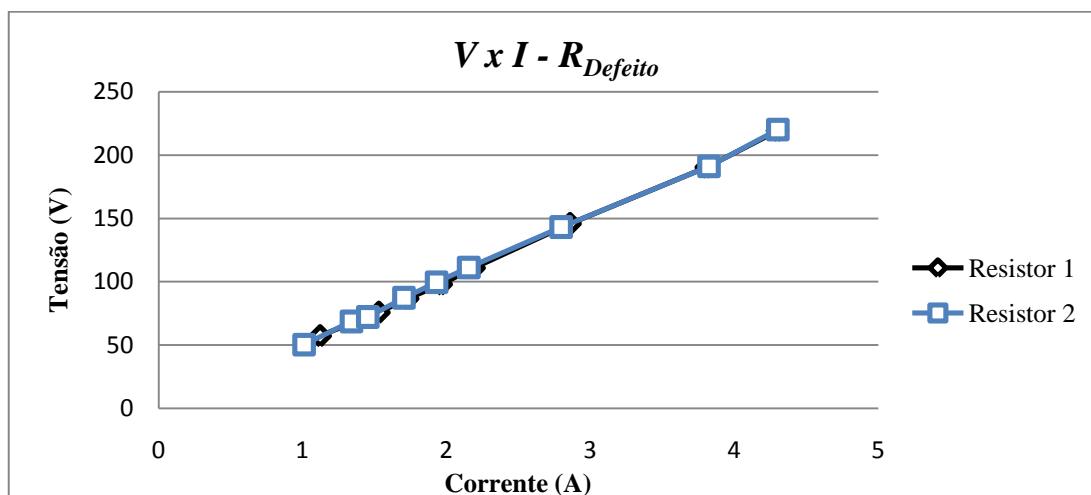
Equipamento usado para medições:

- Multímetros FLUKE tipo 289;

**Tabela 7.5 -** Resultado das medidas do ensaio para obter a resistência que representa o defeito.

	$V_{R1}(V_{RMS})$	$I_1(A_{RMS})$	$R_1(\Omega)$	$V_{R2}(V_{RMS})$	$I_2(A_{RMS})$	$R_2(\Omega)$
<b>Medida 1</b>	57,25	1,12	50,98	50,30	1,01	49,80
<b>Medida 2</b>	69,3	1,39	49,89	68,60	1,34	51,19
<b>Medida 3</b>	75,80	1,53	49,51	72,10	1,45	49,59
<b>Medida 4</b>	86,70	1,73	50,09	87,30	1,71	51,20
<b>Medida 5</b>	98,00	1,96	49,90	99,50	1,93	51,50

<b>Medida 6</b>	110,90	2,19	50,59	111,20	2,16	51,60
<b>Medida 7</b>	145,80	2,86	51,00	143,20	2,80	51,20
<b>Medida 8</b>	190,30	3,81	50,00	191,20	3,82	50,00
<b>Medida 9</b>	219,30	4,30	51,00	220,30	4,30	51,20
		Média	50,09		Média	51,20



**Figura 7.8** - Característica  $v \times i$  da defeito.

## 7.8 – Resultados de ensaio para obtenção da reatância capacitiva do BCS

O ensaio para a obtenção da característica da resistência que representa o defeito foi realizado conforme descrito em [3] e os resultados mostram as características das dez células usadas em paralelo.

Placa de identificação das células capacitivas:

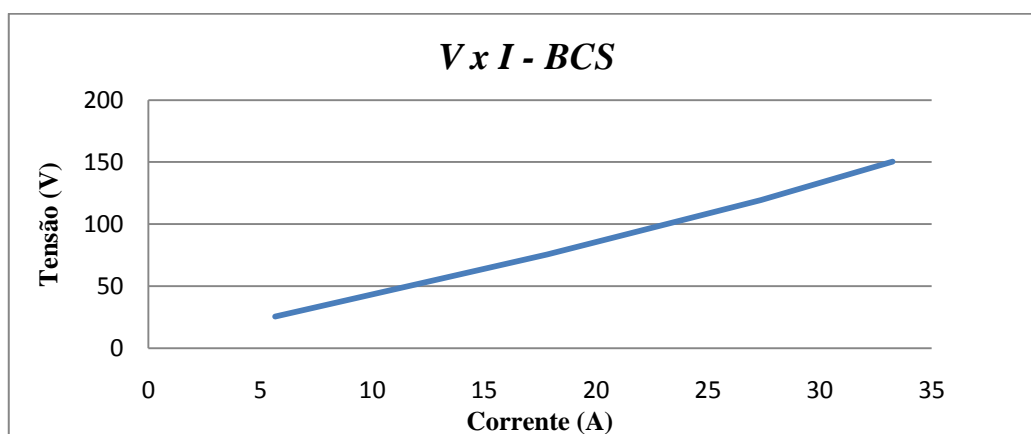
- Marca: WEG;
- Capacitância – 58,9  $\mu\text{F}$ ;
- Potência Nominal de 3,33 kvar em 380 Volts/60Hz;
- Erro:  $\pm 5\%$ .

Equipamento usado para medições:

- Multímetros FLUKE tipo 289;

**Tabela 7.6** - Resultado das medidas do ensaio para obter a reatância capacitiva do BCS.

	<i>Tensão nos terminais da carga (<math>V_{RMS}</math>)</i>	<i>Corrente no circuito (<math>A_{RMS}</math>)</i>	<i>Resistência da carga (<math>\Omega</math>)</i>
<b>Medida 1</b>	25,50	5,66	4,50
<b>Medida 2</b>	75,50	17,82	4,24
<b>Medida 3</b>	119,50	27,37	4,37
<b>Medida 4</b>	150,50	33,26	4,52
<b>Média</b>			4,44

**Figura 7.9** - Característica  $v \times i$  do BCS.

## 7.9 – Resultados de ensaio para obtenção das características do Reator Naturalmente Saturado (RNS)

Os ensaios para a obtenção da característica do RNS foi realizado conforme descrito em [3].

**Tabela 7.7** – Resultados das medidas do ensaio para obter a resistência do RNS para a Estrutura Assimétrica.

	<i>Tensão nos terminais do RNS – (<math>V_{CC}</math>)</i>	<i>Corrente no circuito – (<math>A_{CC}</math>)</i>	<i>Resistência do reator linear (<math>\Omega</math>)</i>
<b>Medida 1</b>	0,220	0,780	0,282
<b>Medida 2</b>	0,350	1,220	0,287
<b>Medida 3</b>	0,550	1,850	0,297
<b>Medida 4</b>	0,750	2,600	0,288
<b>Média</b>			0,289

**Tabela 7.8** – Resultados das medidas do ensaio para obter a resistência do RNS para a Estrutura Simétrica.

	<i>Tensão nos terminais do RNS– (V<sub>CC</sub>)</i>	<i>Corrente no circuito – (A<sub>CC</sub>)</i>	<i>Resistência do reator linear (Ω)</i>
<b>Medida 1</b>	0,072	0,97	0,0742
<b>Medida 2</b>	0,125	1,68	0,0744
<b>Medida 3</b>	0,19	2,55	0,0745
<b>Medida 4</b>	0,228	3,07	0,0742
<b>Média</b>			0,0743

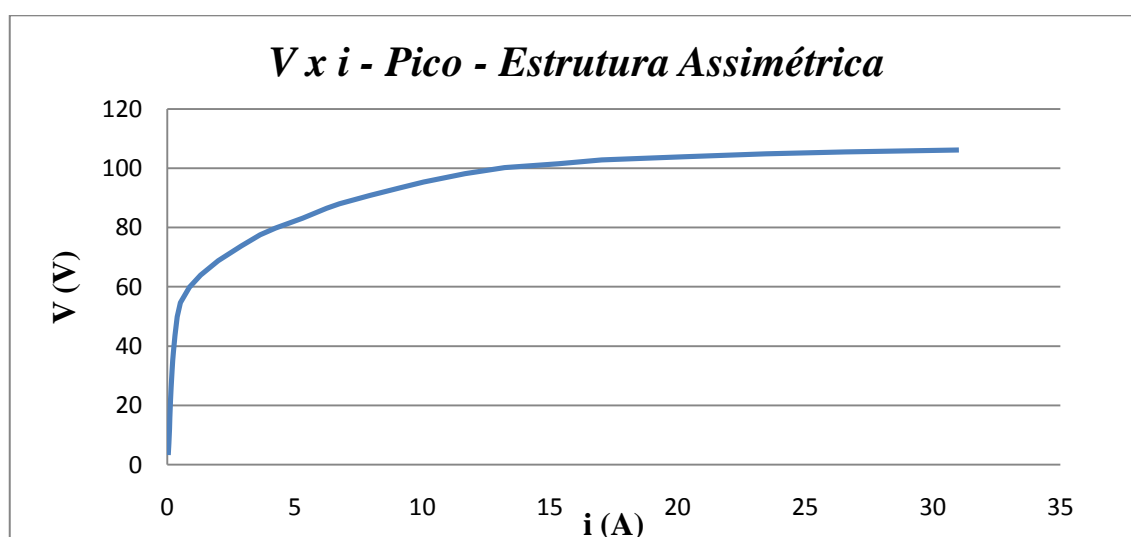
**Tabela 7.9** – Resultado das medidas do ensaio para obter as perdas totais no ferro do RNS.

	<i>Tensão nos terminais do RNS (V)</i>	<i>Corrente no circuito (A)</i>	<i>Potência ativa total do RNS (W)</i>	<i>Perdas ôhmicas – <math>RxI^2</math> (W)</i>	<i>Perdas no Ferro (W)</i>	<i>Resistência das perdas totais no ferro (Ω)</i>
<b>Medida 1</b>	21,350	0,116	1,640	0,003	1,637	278,530
<b>Medida 2</b>	30,850	0,196	3,270	0,010	3,260	291,931
<b>Medida 3</b>	40,380	0,390	5,400	0,039	5,361	304,163
<b>Medida 4</b>	51,100	1,415	9,000	0,517	8,483	307,801
<b>Medida 5</b>	60,800	3,240	14,000	2,708	11,292	327,379
<b>Medida 6</b>	69,300	5,610	22,000	8,120	13,880	345,996
<b>Medida 7</b>	73,850	7,630	30,000	15,020	14,980	364,073
<b>Medida 8</b>	78,000	9,840	41,000	24,981	16,019	379,799
<b>Média</b>						324,959

**Tabela 7.10** – Resultado das medidas do ensaio para obter as características  $\lambda x i$  e  $v x i$  do RNS da Estrutura Assimétrica.

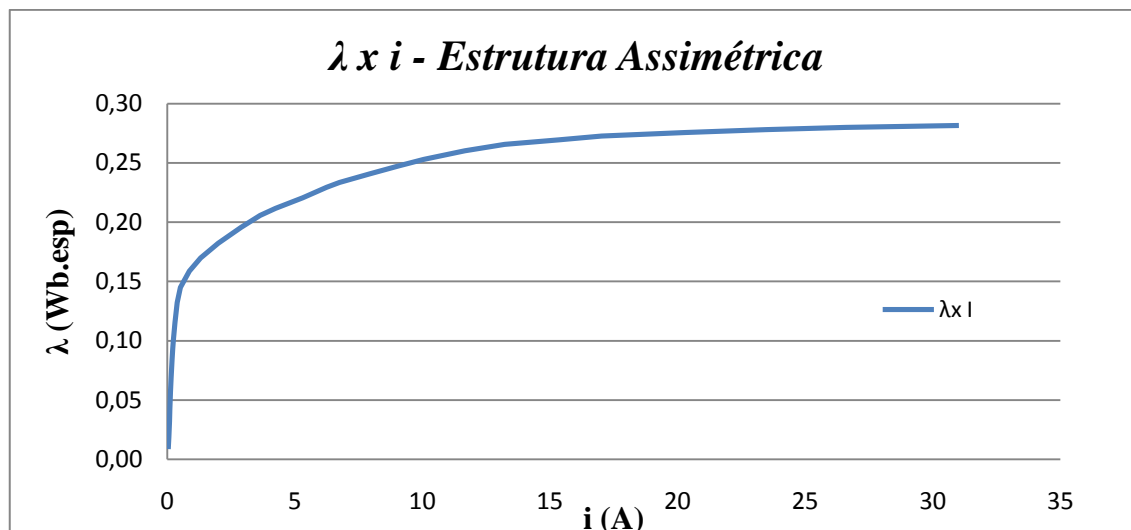
	<i>Corrente de pico do circuito (A<sub>Pico</sub>)</i>	<i>Fluxo de enlace (Wb.esp)</i>	<i>Tensão de pico (V<sub>Pico</sub>) – <math>\lambda * 377</math></i>
<b>Medida 1</b>	0,0325	0,0087	3,2784
<b>Medida 2</b>	0,0551	0,0188	7,0850
<b>Medida 3</b>	0,0806	0,0319	12,0354
<b>Medida 4</b>	0,0990	0,0421	15,8582
<b>Medida 5</b>	0,1258	0,0571	21,5150
<b>Medida 6</b>	0,1499	0,0690	25,9995
<b>Medida 7</b>	0,1838	0,0841	31,7235

<b>Medida 8</b>	0,2093	0,0933	35,1609
<b>Medida 9</b>	0,2333	0,1004	37,8497
<b>Medida 10</b>	0,2941	0,1154	43,5037
<b>Medida 11</b>	0,3917	0,1324	49,9171
<b>Medida 12</b>	0,5090	0,1449	54,6097
<b>Medida 13</b>	0,8640	0,1586	59,8062
<b>Medida 14</b>	1,3080	0,1697	63,9684
<b>Medida 15</b>	1,9937	0,1823	68,7456
<b>Medida 16</b>	2,8987	0,1957	73,7812
<b>Medida 17</b>	3,6340	0,2056	77,5157
<b>Medida 18</b>	4,2420	0,2116	79,7581
<b>Medida 19</b>	5,3025	0,2207	83,1892
<b>Medida 20</b>	6,2499	0,2295	86,5352
<b>Medida 21</b>	6,7448	0,2334	87,9855
<b>Medida 22</b>	7,9325	0,2408	90,7876
<b>Medida 23</b>	9,0779	0,2476	93,3280
<b>Medida 24</b>	10,0394	0,2530	95,3944
<b>Medida 25</b>	11,6655	0,2603	98,1196
<b>Medida 26</b>	13,2209	0,2657	100,1730
<b>Medida 27</b>	15,3278	0,2693	101,5276
<b>Medida 28</b>	17,0246	0,2727	102,8036
<b>Medida 29</b>	20,2909	0,2755	103,8635
<b>Medida 30</b>	23,4441	0,2781	104,8384
<b>Medida 31</b>	26,5832	0,2799	105,5376
<b>Medida 32</b>	31,0232	0,2816	106,1545



**Figura 7.10** - Característica  $v \times i$  do RNS para a Estrutura Assimétrica.

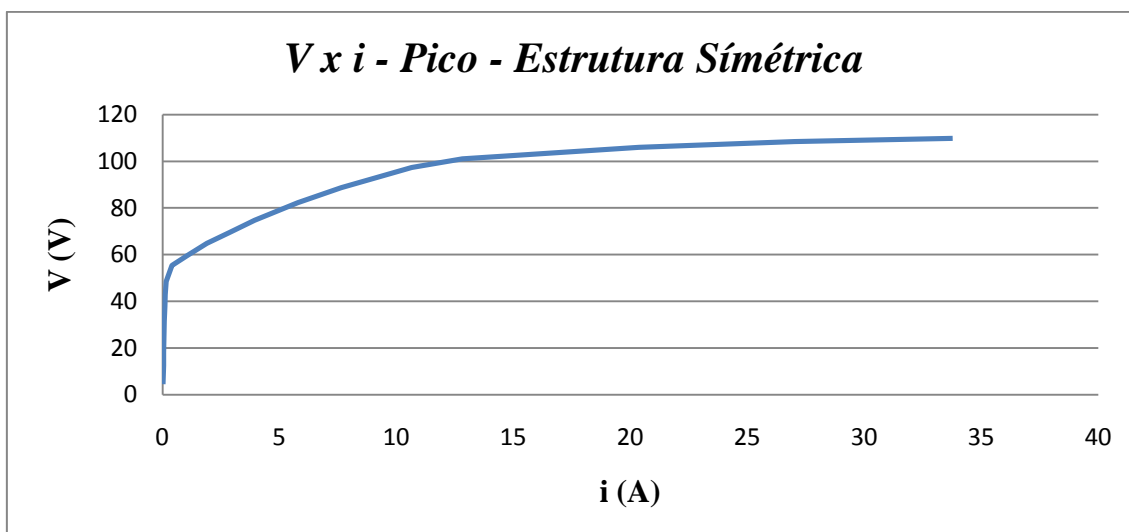




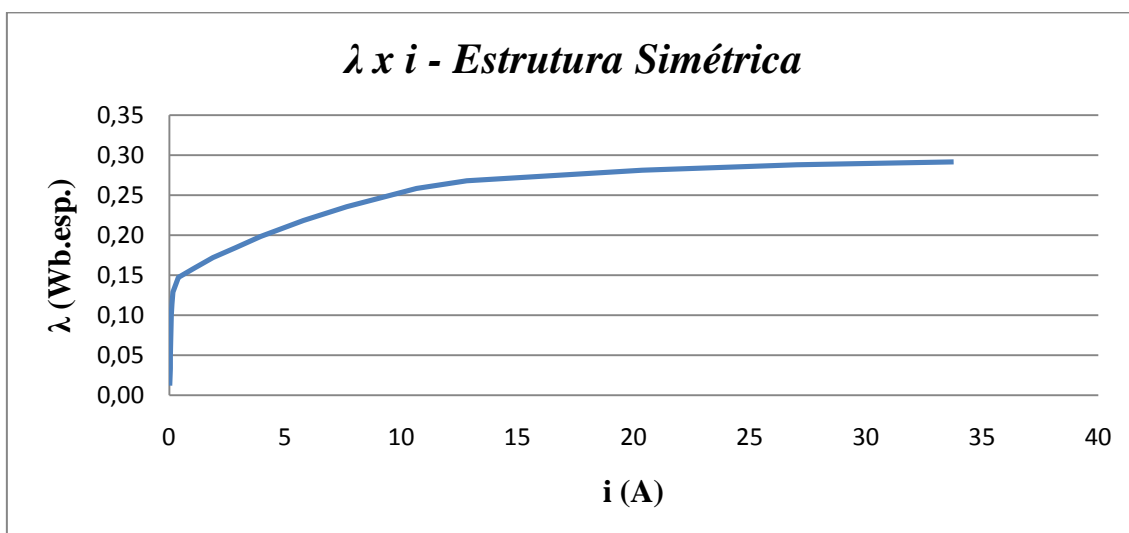
**Figura 7.11** - Característica  $\lambda \times i$  do RNS para a Estrutura Assimétrica.

**Tabela 7.11** – Resultado das medidas do ensaio para obter as características  $\lambda \times i$  e  $v \times i$  do RNS da Estrutura Simétrica.

	<i>Corrente de pico do circuito (<math>A_{Pico}</math>)</i>	<i>Fluxo de enlace (Wb.esp)</i>	<i>Tensão de pico (<math>V_{Pico}</math>) – <math>\lambda * 377</math></i>
<b>Medida 1</b>	0,0226	0,0117	4,4047
<b>Medida 2</b>	0,0424	0,0330	12,4589
<b>Medida 3</b>	0,0509	0,0481	18,1271
<b>Medida 4</b>	0,0651	0,0661	24,9105
<b>Medida 5</b>	0,0778	0,0836	31,5247
<b>Medida 6</b>	0,0962	0,1003	37,8117
<b>Medida 7</b>	0,1174	0,1139	42,9239
<b>Medida 8</b>	0,1584	0,1285	48,4395
<b>Medida 9</b>	0,3960	0,1470	55,4157
<b>Medida 10</b>	1,0607	0,1582	59,6303
<b>Medida 11</b>	1,8851	0,1719	64,8089
<b>Medida 12</b>	2,8567	0,1844	69,5273
<b>Medida 13</b>	3,9315	0,1983	74,7480
<b>Medida 14</b>	5,7841	0,2184	82,3205
<b>Medida 15</b>	7,6368	0,2354	88,7617
<b>Medida 16</b>	10,6490	0,2582	97,3542
<b>Medida 17</b>	12,8128	0,2679	101,0026
<b>Medida 18</b>	20,3647	0,2810	105,9303
<b>Medida 19</b>	27,0115	0,2877	108,4787
<b>Medida 20</b>	33,7714	0,2914	109,8572



**Figura 7.12** - Característica  $v \times i$  do RNS para a Estrutura Simétrica.



**Figura 7.13** - Característica  $\lambda \times i$  do RNS para a Estrutura Simétrica.

Equipamentos usados para medições:

- Multímetros FLUKE tipo 289;
- Osciloscópio TEKTRONIX tipo TPS 2024.

## **7.10 – Resultados de ensaio para obtenção das características do Reator Linear Série (RLS)**

Os ensaios para a obtenção da característica do RLS foi realizado conforme descrito em [3].

**Tabela 7.12** – Resultados das medidas do ensaio para obter a resistência do RLS para a Estrutura Assimétrica.

	<i>Tensão nos terminais do RLS – (V<sub>CC</sub>)</i>	<i>Corrente no circuito – (A<sub>CC</sub>)</i>	<i>Resistência do reator linear (Ω)</i>
<b>Medida 1</b>	0,130	0,480	0,271
<b>Medida 2</b>	0,260	0,810	0,321
<b>Medida 3</b>	0,420	1,430	0,294
<b>Medida 4</b>	0,710	2,450	0,290
<b>Média</b>			0,294

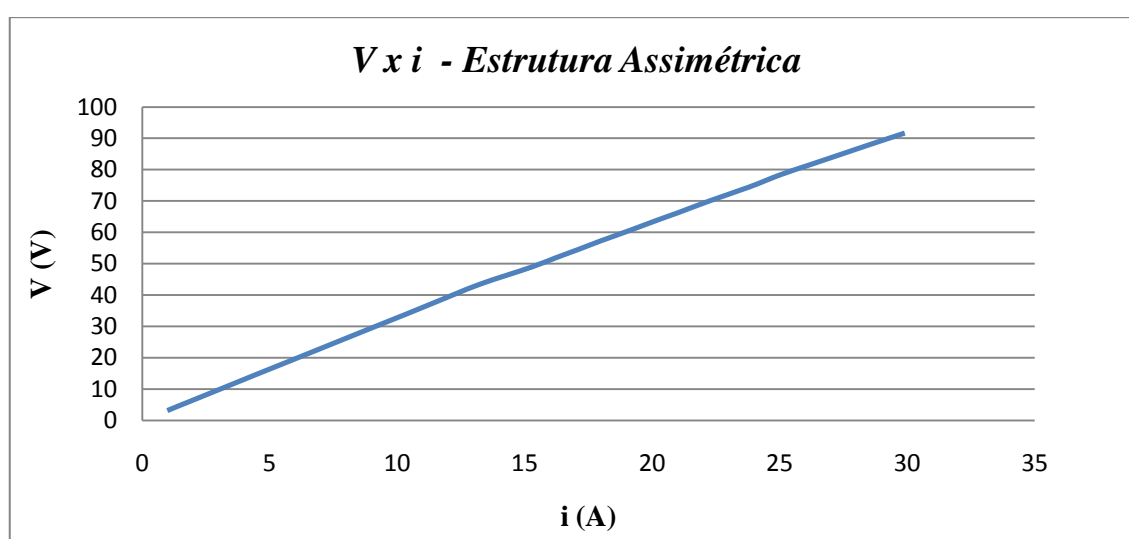
**Tabela 7.13** – Resultados das medidas do ensaio para obter a resistência do RLS para a Estrutura Simétrica.

	<i>Tensão nos terminais do RNS– (V<sub>CC</sub>)</i>	<i>Corrente no circuito – (A<sub>CC</sub>)</i>	<i>Resistência do reator linear (Ω)</i>
<b>Medida 1</b>	0,081	1,08	0,0750
<b>Medida 2</b>	0,146	1,94	0,0753
<b>Medida 3</b>	0,179	2,38	0,0752
<b>Medida 4</b>	0,230	3,05	0,0754
<b>Média</b>			0,0752

**Tabela 7.14** – Resultado das medidas do ensaio para obter a indutância dos RLS do ARMTRS para a Estrutura Assimétrica.

	<i>Tensão nos terminais do RLS (V)</i>	<i>Corrente no circuito (A)</i>	<i>Reatância do RLS (Ω)</i>
<b>Medida 1</b>	3,1891	0,9758	3,2681
<b>Medida 2</b>	4,6146	1,4071	3,2794
<b>Medida 3</b>	11,3137	3,4436	3,2854
<b>Medida 4</b>	14,3967	4,3727	3,2924
<b>Medida 5</b>	18,7242	5,6993	3,2854
<b>Medida 6</b>	24,4376	7,4388	3,2852
<b>Medida 7</b>	29,8116	9,0793	3,2835
<b>Medida 8</b>	34,0967	10,3945	3,2803
<b>Medida 9</b>	37,9009	11,5400	3,2843
<b>Medida 10</b>	43,4164	13,2229	3,2834
<b>Medida 11</b>	48,8469	15,2311	3,2071
<b>Medida 12</b>	51,8734	16,2069	3,2007
<b>Medida 13</b>	54,5886	17,1120	3,1901
<b>Medida 14</b>	57,2756	17,9747	3,1865

<b>Medida 15</b>	60,6273	19,1202	3,1709
<b>Medida 16</b>	63,9366	20,2091	3,1638
<b>Medida 17</b>	66,3266	21,0294	3,1540
<b>Medida 18</b>	70,0319	22,2456	3,1481
<b>Medida 19</b>	74,4583	23,8012	3,1283
<b>Medida 20</b>	78,3474	25,0174	3,1317
<b>Medida 21</b>	81,4587	26,1488	3,1152
<b>Medida 22</b>	84,4285	27,2378	3,0997
<b>Medida 23</b>	87,9641	28,5247	3,0838
<b>Medida 24</b>	91,6410	29,8965	3,0653
<b>Média</b>			3,2007

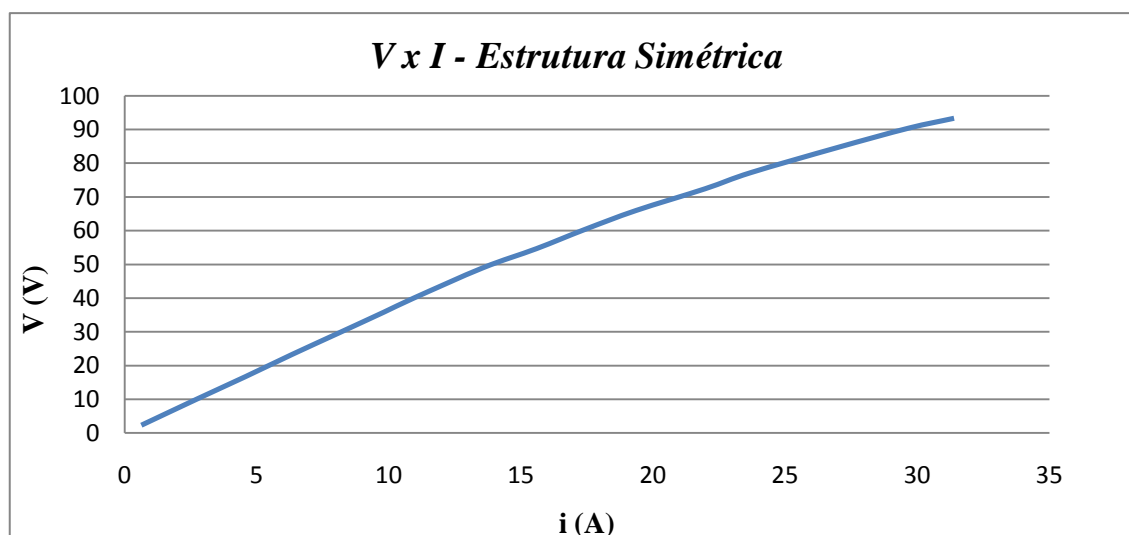


**Figura 7.14** - Característica  $v \times i$  do RLS para a Estrutura Assimétrica.

**Tabela 7.15** – Resultado das medidas do ensaio para obter a indutância dos RLS do ARMTRS para a Estrutura Simétrica.

	<b><i>Tensão nos terminais do RLS (V)</i></b>	<b><i>Corrente no circuito (A)</i></b>	<b><i>Reatância do RLS (<math>\Omega</math>)</i></b>
<b>Medida 1</b>	2,2670	0,6251	3,6267
<b>Medida 2</b>	10,1116	2,7506	3,6761
<b>Medida 3</b>	16,6453	4,5566	3,6530
<b>Medida 4</b>	23,2780	6,3357	3,6741
<b>Medida 5</b>	29,6985	8,1176	3,6585
<b>Medida 6</b>	35,8362	9,8146	3,6513
<b>Medida 7</b>	39,9091	10,9177	3,6554
<b>Medida 8</b>	48,9459	13,5482	3,6127
<b>Medida 9</b>	54,6594	15,5846	3,5073
<b>Medida 10</b>	60,3728	17,4231	3,4651
<b>Medida 11</b>	65,9872	19,3606	3,4083
<b>Medida 12</b>	72,4077	21,9627	3,2968

<b>Medida 13</b>	77,2161	23,7022	3,2578
<b>Medida 14</b>	84,5700	26,9408	3,1391
<b>Medida 15</b>	90,3682	29,6561	3,0472
<b>Medida 16</b>	93,3381	31,3955	2,9730
<b>Média</b>			3,5600



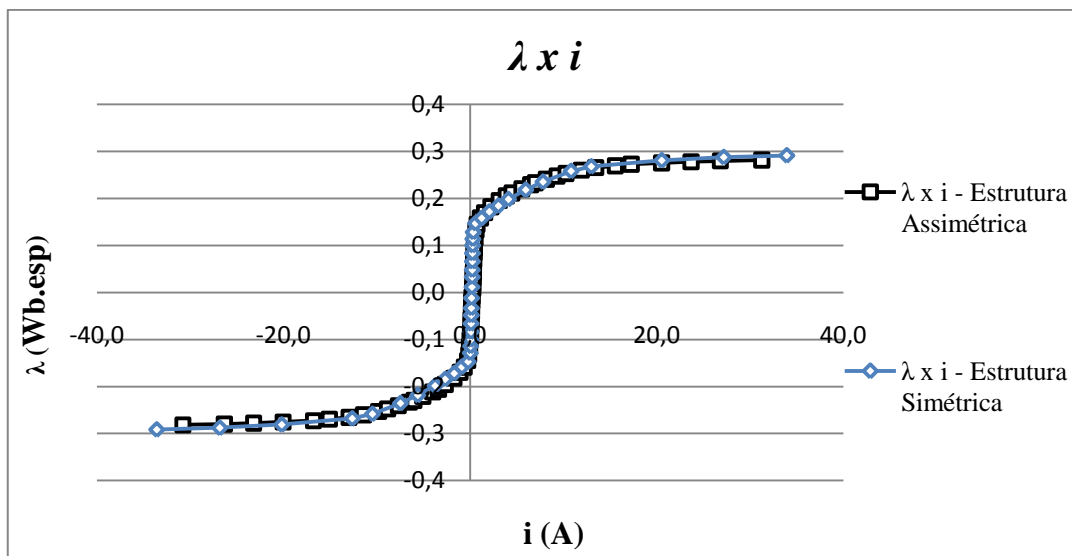
**Figura 7.15** - Característica  $v \times i$  do RLS para a Estrutura Simétrica.

Equipamentos usados para medições:

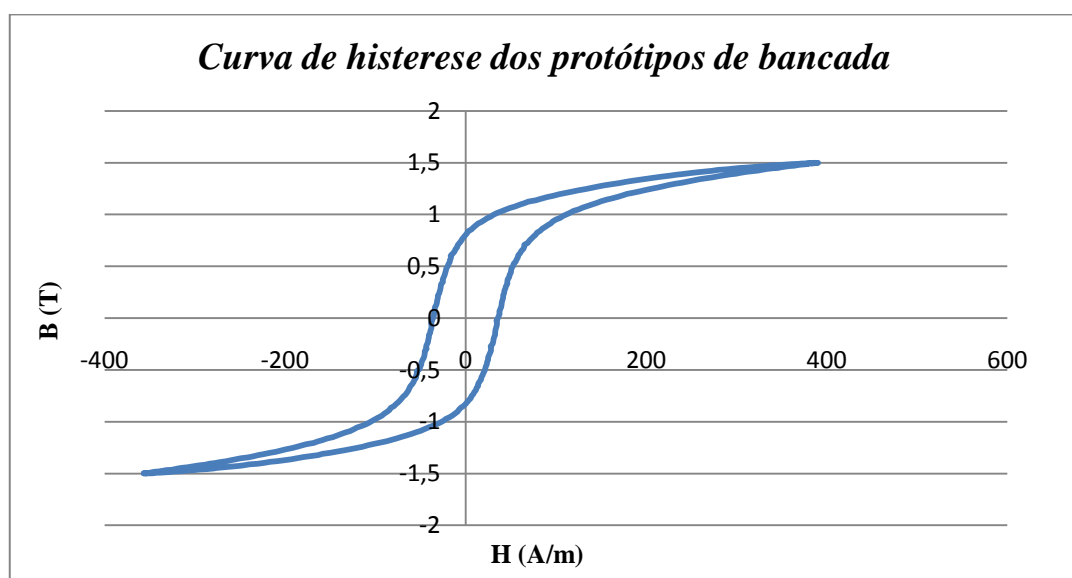
- Multímetros tipo 289 da marca FLUKE.

### **7.11 - Curva característica $\lambda \times i$ usada na modelagem do elemento nonlinear current-dependent inductor (TYPE 96)**

A Figura 7.16 mostra a curva característica  $\lambda \times i$  usada na modelagem do RNS. Ela foi obtida através da curva de histerese (Figura 7.17), das equações 3.18 e 3.22 e os parâmetros do protótipo.



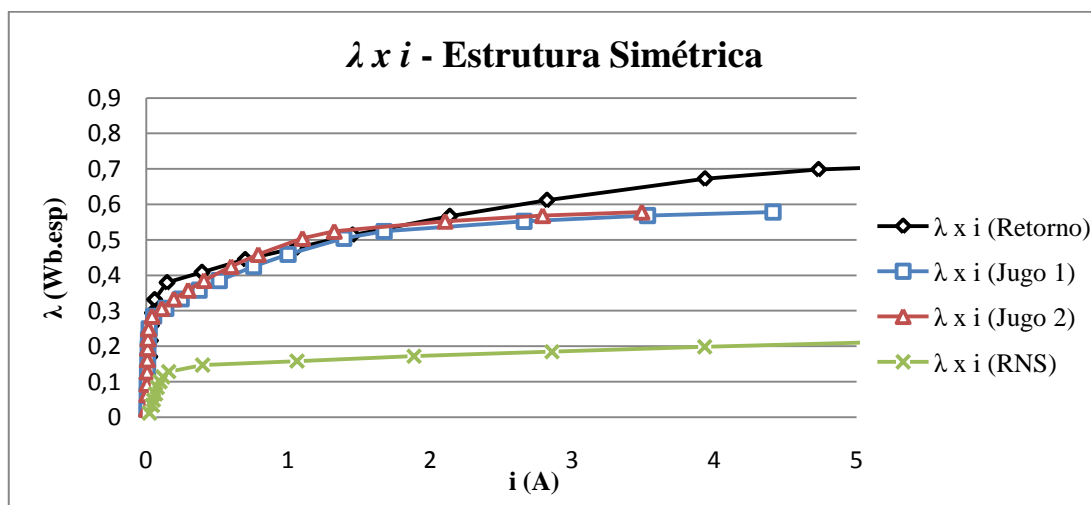
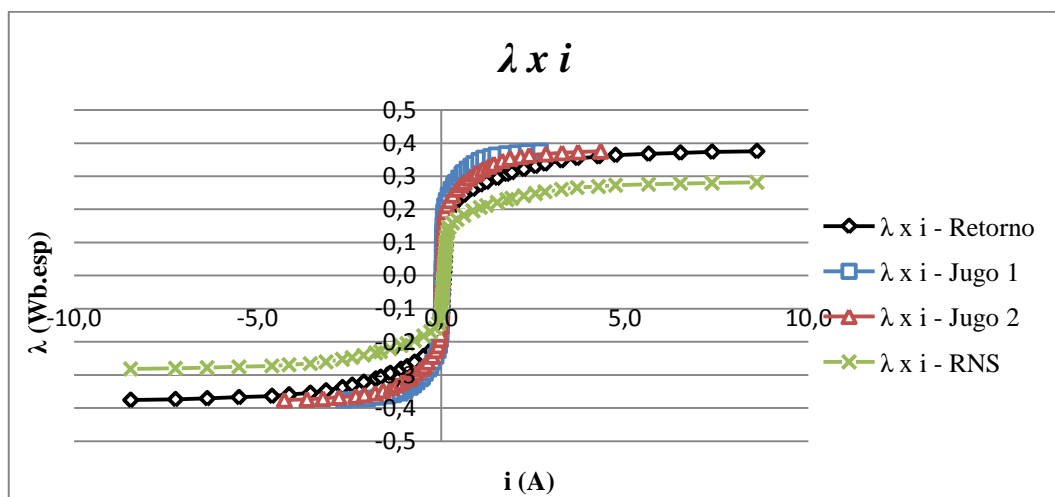
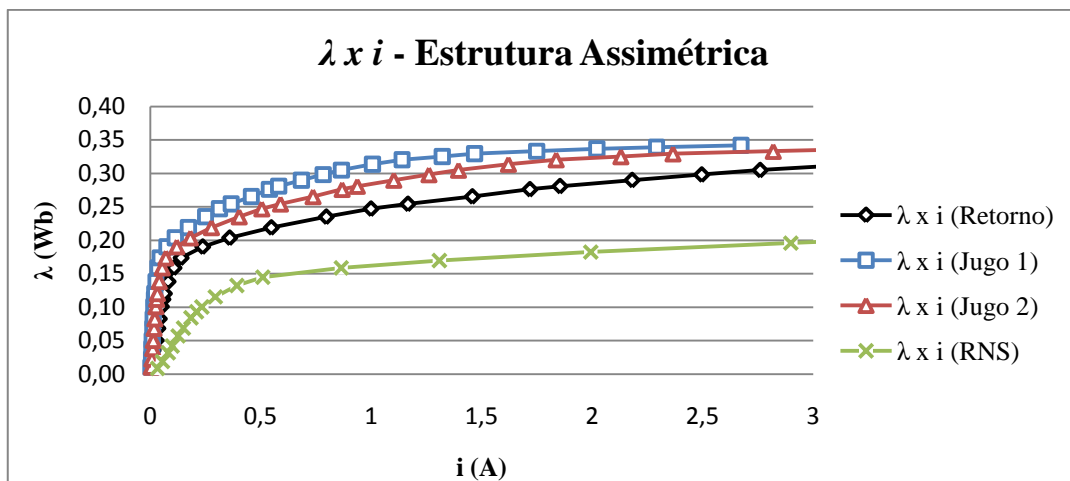
**Figura 7.16** – Curva  $\lambda \times i$  usada para a modelagem dos protótipos com elemento type 96 sem dualidade eletromagnética – (□) Estrutura Assimétrica e (◇) Estrutura Simétrica.

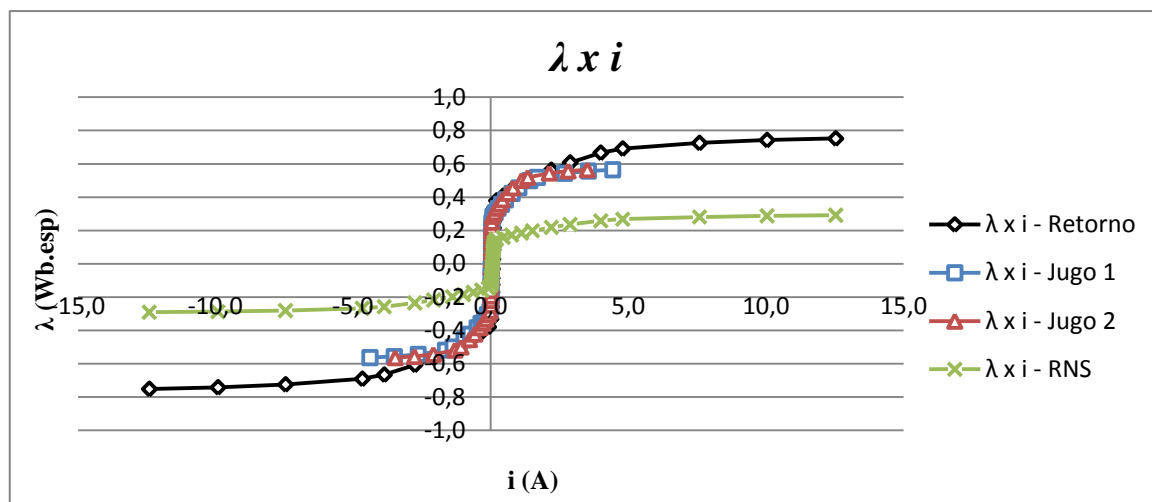


**Figura 7.17** – Curva de histerese do protótipo de bancada.

## 7.12 – Curva característica $\lambda \times i$ usada na modelagem dos protótipos de bancada com dualidade eletromagnética

As curvas de magnetização usadas na modelagem dos protótipos de bancada com dualidade eletromagnética são mostradas nas Figuras 7.18, 7.19, 7.20 e 7.21 e foram obtidas a partir das Equações 3.18 a 3.22.





**Figura 7.21** - Característica  $\lambda x i$  – Para a Estrutura Simétrica com dualidade eletromagnética – ( $\diamond$ ) Retorno, ( $\square$ ) Jugo 1, ( $\Delta$ ) Jugo 2 e ( $x$ ) RNS elemento type 96 .

### 7.13 - Resultados de ensaio para auto-regulação da carga conectada a jusante do ARMTRS

**Tabela 7.16** – Resultados das medidas do ensaio para auto-regulação da carga conectada a jusante do ARMTRS.

	$V_{CARGA-Jusante}(V_{RNS})$	$I_{TOTAL-Montante}(A_{RMS})$
<b>Medida 1</b>	22,99	0,31
<b>Medida 2</b>	44,05	0,61
<b>Medida 3</b>	64,24	0,91
<b>Medida 4</b>	88,52	1,22
<b>Medida 5</b>	110,40	1,52
<b>Medida 6</b>	130,30	1,82
<b>Medida 7</b>	154,20	2,13
<b>Medida 8</b>	176,00	2,43
<b>Medida 9</b>	195,90	2,74
<b>Medida 10</b>	219,80	3,04

Equipamentos usados para medições:

- Multímetros tipo 289 da marca FLUKE.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] LEÃO, S. E. C. C. *Análise do Auto-Regulador Magnético de Tensão (ARMT) para Controle da Tensão em Redes de Distribuição de 13,8 kV*. Recife, 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Centro de Tecnologia e Geociência Universidade Federal de Pernambuco;
- [2] ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. *Legislação Básica do Setor Elétrico Brasileiro – Resoluções*. Volume II, Março 2002, p. 506 – 519;
- [3] FREITAS, F. E. F.; 2010. *Aplicação Série de Reatores Naturalmente Saturados em Sistemas de Potência*. Recife, PE. Dissertação (Mestrado em engenharia elétrica) – Universidade Federal de Pernambuco;
- [4] INDUCON. *Manual Inducon – Capacitores de Potência*. Jaguariúna – SP: LAELC Indústria e Comércio Ltda, p. 39, 1999;
- [5] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. *Referências Bibliográficas, IEEE Std 1036*. New York, 1992.
- [6] THANAWLA, H. L.; YOUNG, D.J.; T. *Saturated Reactors – Some recent applications in power systems*. Energy International, Volume 7, Number 11, p. 3, 1970;
- [7] LEAL, F. S. *Reatores Saturados com Excitação Paralela*. Dissertação de Mestrado, UFPE, 2000.
- [8] MAGNATA DA FONTE, L. A. *Reator Saturado – Alguns aspectos Operacionais e de Projeto*. Dissertação de Mestrado, UFPE, Dezembro 1997.
- [9] MARTIGNONI, Alfonso. *Transformadores*. Porto Alegre: Editora Globo, p.79, 1971;

- [10] DEL VECCHIO, Robert M.; POULIN, Bertrand; T. FEGHALI, Pierre; *et al.* *Transformer Desing Principles: With Applications to Core-Form Power Transformers.* New York, NY: Copyright © by Taylor & Francis, p. 10-15, 2002;
- [11] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Transformador de potência*, NBR 5356. Rio de Janeiro, p. 2, 1993;
- [12] STAFF, E. E. *Circuitos Magnéticos Y Transformadores.* Cambridge, Massachusetts: Editorial Reverté, S. A., p. 66-82, 1965;
- [13] VAN DEN BOSSCHE, Alex; VALCHEV, Vencisslav; FILCHEV, Todor. *Improved approximation for fringing permeances in gapped inductors.* IEEE, Belgium, p. 1, 2002;
- [14] PARIKSHITH, B. C.; VINOD, John; BANGALORE, Karnataka. *Higher oder output filter desing for grid connected power converters.* Fifteenth National Power Systems Conference (NPSC), IIT Bombay, p. 617, December 2008;
- [15] GROVER, F. W. *Inductance Calculations.* Mineola, New York: Dover Publications, INC. p. 142-143, 2009;
- [16] N2A EQUIPAMENTOS. *Manual de operação da chave estatística especial e controlador de potência.* Recife – PE: N2A Equipamentos, 2010;
- [17] CHERRY, F. W. *The duality of inter-linked eletric and magnetic circuits and the formation of transformer equivalent circuit, Proc. Phys. Soc of London (B), vol.2, p.101,1949;*
- [18] KRON, G. *The Equivalent Eletric Circuit Of Rotating Eletric Machinery,* New York, J. Wiley & Sons, 1951;
- [19] PRIKLER, L.; HOIDALEN H. K. *The Equivalent Eletric Circuit Of Rotating Eletric Machinery User's Manual – ATPdraw version 3.5,* p. 215-218, 2002;

[20] MORK, B. A.; GONZALEZ, F.; ISHCENKO, D.; *et al.* *Hybrid Transformer Model for Transient Simulation – Part I: Development and Parametrs.* IEEE Transactions on power delivery, Vol. 22, NO.1, January, 2007;

[21] COMPANHIA ENERGÉTICA DE PERNAMBUCO – CELPE. *Especificação Regulador de Tensão Monofásico.* THOSHIBA do Brasil, S.A.